

大变形条件下桩土共同工作及试验研究

Study on pile-soil interaction under large deflection and its model test

吴 鸣, 赵明华

(湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410082)

摘 要: 首先总结和分析了目前大变形条件下桩土共同工作现状, 然后采用层状各向同性弹性半空间地基模型, 运用有限元—有限层法, 对大变形条件下桩土共同工作性状进行了分析, 并开发出相应的实用计算程序。最后探讨了柔性桩的室内模型试验, 实测结果表明理论与实测值吻合良好。

关键词: 大变形; 有限元—有限层法; 桩土共同工作; 层状地基模型; 模型试验

中图分类号: TU 473

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2001)04-0436-05

作者简介: 吴 鸣, 男, 1975 年生。2000 年获湖南大学岩土工程专业硕士学位, 主要从事桥梁桩基及基础工程方面的研究。

WU Ming, ZHAO Ming-hua

(College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: The status of pile-soil interaction under large deflection is summarized and analyzed in this paper. Based on the horizontally layered isotropic and elastic half-space soil model, the properties of pile-soil interaction under large deflection are analyzed by the finite element-finite layer method and a practical program is worked out. At last, model tests of flexible piles are carried out, the results show that the theoretical values closed with those measured.

Key words: large deflection; finite element-finite layer method; pile-soil interaction; layered soil model; model tests

1 前 言*

桥梁取消伸缩缝, 加快了施工进度, 增加了行车舒适度, 提高了桥梁的抗震性和美观。据统计, 总长度在 100 m 以下的桥梁占全部桥梁的 80% 以上, 若这些桥梁完全实现无缝化, 其社会和经济效益将是巨大的。然而推广与应用无缝桥梁急需解决的一个关键问题是在大变形条件下, 如何确定桩与土的共同工作, 即建立桩与土相互作用的本构关系, 提出在轴、横向荷载(或倾斜荷载)作用下桩身的受力分析模型, 以及基桩极限承载力的确定方法。然而, 轴、横向荷载下基桩的受力研究是一个相当复杂的课题, 至今尚没有成熟公认的算法, 尤其是在大变形条件下。正如横山幸满^[1]所指出的: 同时受轴向力及横向力作用的桩, 严格地说, 应力迭加原理对其是不适用的。基桩在轴、横向荷载作用下, 不仅其水平力将使桩身产生较大的弯矩和挠曲变形, 竖向力也将由于桩身挠曲变形的出现而产生一附加弯矩(即所谓的“ $P-\Delta$ ”效应), 而这一附加弯矩又将促进桩身挠曲变形的增加, 在设计计算中不容忽视^[2,3]。

长期以来, 对于轴、横向荷载同时作用下基桩的内力和位移分析, 都基于文克尔地基模型, 该模型忽略了土介质的连续性, 不易考虑土应力-应变关系的非线性特性, 不能充分反映桩-土共同作用的实际情况, 存在很多不合理的地方, 在大变形条件下更是如此。此

外, “张氏”法在国内外已趋淘汰, “ m ”法只适用于桩在地面处位移不大的情况(一般不超过 6 mm)亦即小变形条件下。因此, 本文拟采用层状各向同性弹性半空间地基模型, 该模型能够通过调整各土层的物理参数来近似地考虑地基土的非线性, 它可以代表范围广泛的地基。而桩却采用有限单元法, 即用有限元—有限层法分析桩土共同工作, 提出在大变形条件下, 桩与土共同工作的计算模式, 并通过室内模型试验加以验证。

2 地基模型分析

2.1 土体的本构关系

地基模型是研究土体在受力状态下土体内应力-应变关系, 广义地说, 它为应力、应变、应变率、应力水平、应力历史、应力路径、加载率、时间及温度等等之间的函数关系。在大变形条件下, 桩侧土体往往都处于塑性变形阶段, 其应力-应变关系具有下列 3 个方面的特点^[4]: ①应力与应变呈非线性关系, 应变增量方向与总应力有关, 而不是与应力增量有关; ②由于塑性变形是不可逆的, 应力与应变之间不再存在单值对应关系; ③应变不仅与当前的应力状态有关, 而且与应力路径有关。

* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(59678025)

收稿日期: 2001-01-12

因此,在分析大变形条件下桩土共同工作时,所选的地基模型必须能反映土的应力-应变关系的非线性特性,比如弹塑性地基模型、非线性地基模型等。鉴于此类模型分析计算的复杂性,本文采用层状各向同性弹性半空间地基模型,该模型不仅分析计算简单,而且能近似地考虑地基土的非线性。

2.2 层状各向同性弹性半空间地基模型

地基土往往成层沉积而成,呈层状分布,在各层内土的性质比较均匀,而各层之间差别较大。此外,由于扁平颗粒在沉积过程中的取向关系,土体在水平方向和竖直方向的性质(变形模量、泊松比和剪切模量等)存在差异,呈现各向异性的现象,例如水平向模量通常大于竖向模量,而在水平面内却往往是各向同性的,构成以水平面为同性面的所谓横向各向同性弹性体。近二十几年来,成层连续体模型日益受到重视,但其数学处理十分困难。即使是相对来说还稍简单的各向同性多层体系,经过长期的努力,目前也只较好地解决了空间轴对称问题。我国学者张问清等^[5]发展了一种半解析半数值的方法——有限层法,可利用计算机分析任意力系作用下的层状各向异性(包括横向各向同性)的半空间。

选取适当尺度的有限体域 $a \times b \times H$ 来近似半空间体,沿竖向将其分割为 N 层,各层都有适用与本层的五个弹性常数 E_1, E_2, μ_1, μ_2 和 G_2 ,如图1所示。体域的尺度 a, b 和 H 的数值按荷载作用范围选取,以使边界上的位移可以忽略。常取用 $a = b = L, H = \frac{L}{2}$ 。如下卧基岩较浅, H 取基岩埋藏深度。

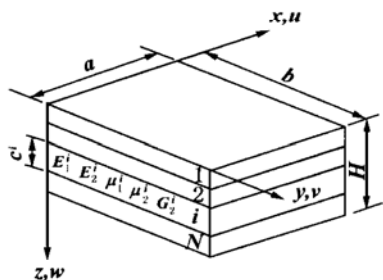


图1 层状各向同性半空间物理模型

Fig. 1 Layered isotropic and elastic halfspace model

(1) A类边界条件,如图2中AB所示。 $x = 0$ 和 $x = a$ 两端面上 $u = 0, \tau_{xz} = 0$; $y = 0$ 和 $y = b$ 两端面上 $v = 0, \tau_{yz} = 0$ 。

(2) B类边界条件,如图2中DE所示。 $x = 0$ 和 $x = a$ 两端面上 $v = w = 0, \sigma_x = 0$; $y = 0$ 和 $y = b$ 两端面上 $u = w = 0, \sigma_y = 0$ 。

底部支承条件亦考虑有代表性的两种: ①刚性粗糙支承,如图2中BC所示。该面上 u, v 和 w 全部为

零; ②刚性光滑支承,如图2中CD所示。该面上 $w = 0$,剪应力为零。

根据大量的计算分析,A类边界条件主要适用于承受横向力的桩土共同工作分析,而B类边界条件主要适用于承受竖向力的桩土共同工作分析。

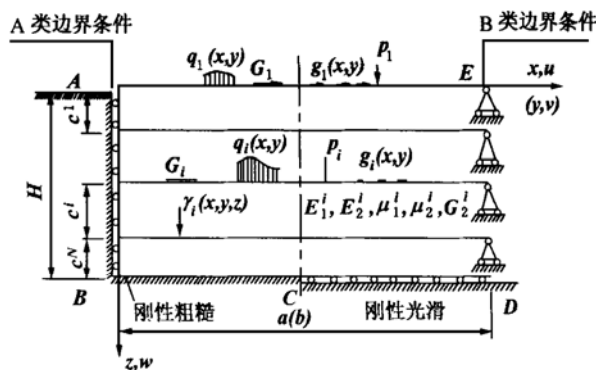


图2 边界条件和支承条件

Fig. 2 Boundary and bearing condition

2.3 土的非线性的考虑

大量研究表明(Alizadeh和Davisson, Awad和Petravits)^[6]: 随着桩水平位移的增大或荷载水平的提高,桩侧土的变形模量近似呈双曲线规律逐渐减小。因此,本文在进行桩土共同作用分析时,可针对实际荷载水平选用不同的变形模量值,或采用增量法,按累计荷载的大小确定不同的计算参数。具体取值应充分重视现场或地质条件类似场地试桩结果反分析所得取值规律。

3 大变形下桩土共同工作分析的有限元—有限层法

3.1 有限元—有限层法

假设地基土由若干水平分布的土层组成,而位于其中的桩不破坏土层的连续性。将地基土划分为水平分布的 n 个单元,置于土中的桩亦相应地划分为 n 个梁单元,各梁单元长度及土层单元厚度,视其所在土层及计算精度要求而定。桩与土通过 $n+1$ 个结点相联结,如图3所示。桩身以下土体除天然分层面外,可按需要做更细地剖分,连同桩身部分,共为 N 层。桩身采用考虑轴力的梁单元,如图3(b)所示,则可建立其单元刚度矩阵 $[K_e]$ 。按通用的对号入座的方法可集成桩的总体刚度矩阵 $[K_p]$,节点外荷载 $\{P\}$,节点上土的支承反力 $\{R\}$,则桩的平衡方程为

$$[K_p]\{U\} = \{P\} - \{\bar{R}\} \quad (1)$$

式中 $\{U\}$ 为桩身结点的位移向量,且

$$\{U\} = [w_1 x_1 \varphi_1 w_2 x_2 \varphi_2 \cdots x_{n+1} \varphi_{n+1}]^T \quad (2)$$

地基采用层状各向同性弹性半空间地基模型,A类边

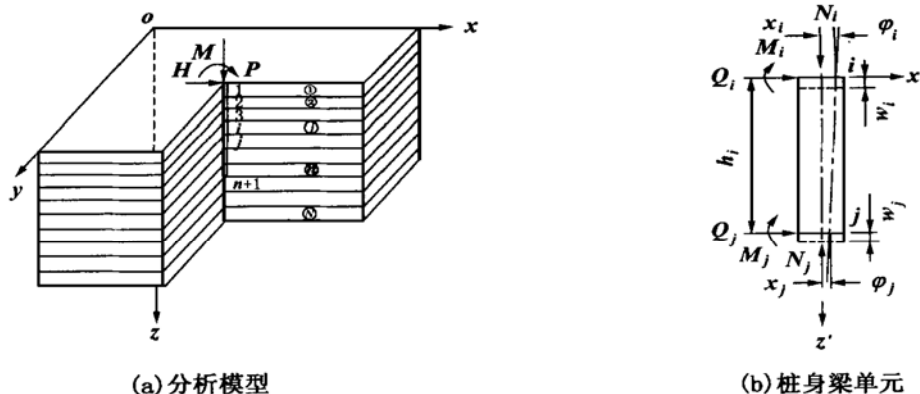


图 3 轴、横向荷载桩的有限元—有限层法计算模型

Fig. 3 The model of finite element—finite layer method

界条件, 见图 2。则可按有限层方法建立关于节点 1 ~ $n+1$ 的, 在轴、横向荷载作用下的地基柔度矩阵 $[\delta_j]$ 和刚度矩阵 $[K_s] = [\delta_j]^{-1}$ 。由桩土连接节点处位移的连续性有

$$[\bar{K}_s] \{ U \} = \{ \bar{R} \} \quad (3)$$

式中 $[\bar{K}_s]$ 和 $\{ \bar{R} \}$ 为阶数扩充矩阵和向量。将式(3)代入式(1)可得到在轴、横向荷载作用下, 桩与土共同作用的基本方程为

$$[K_p + \bar{K}_s] \{ U \} = \{ P \} \quad (4)$$

根据桩所受外荷载 $\{ P \}$, 则可由式(4)解得桩身位移 $\{ U \}$, 于是可按梁单元计算桩身内力和位移。

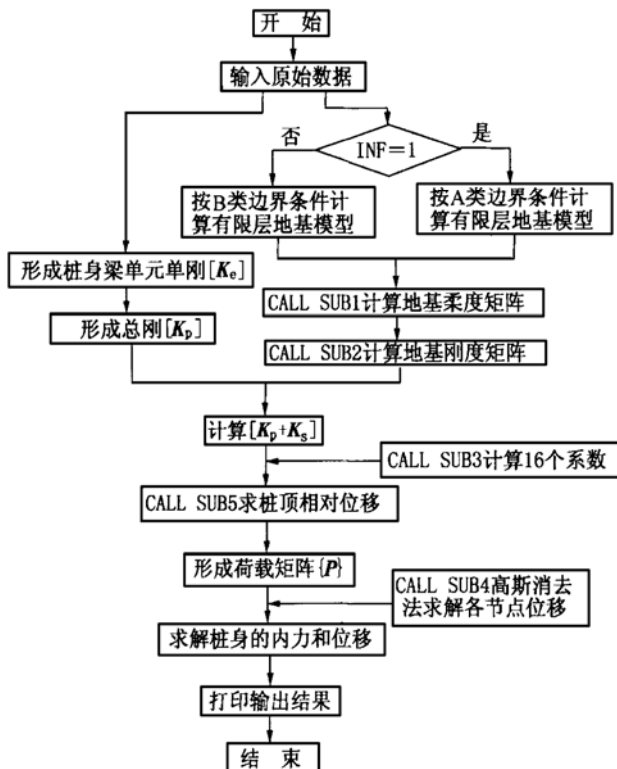


图 4 有限元—有限层法程序设计框图

Fig. 4 The flow chart for finite element—finite layer method

3.2 计算机软件开发

本文以 WINDOWS98 操作平台下的 Microsoft Fortran Powerstation 语言编制了有限元—有限层法分析轴、横向荷载下桩与土共同工作的计算程序。程序编制以层状各向同性弹性半空间地基模型为基础, 并考虑了 $P-\Delta$ 效应对桩身内力及位移的影响。程序设计框图如图 4 所示^[7]。

4 室内模型试验研究

4.1 试验方法研究

桥台下的基桩是在竖向和横向荷载同时作用下工作的。通常的情况下, 基桩的竖向承载力较大, 横向承载力较小, 基桩的承载能力往往由横向荷载控制。文献[8, 9] 等对这种桩的试验研究进行过探讨, 其试验时在桩顶施加一个倾斜荷载, 然后加以分解, 然而这种加载方式存在许多不合理之处。鉴于目前所研究的桥梁基桩, 主要以承受恒载为主, 因此, 基桩所承受的竖向荷载可看成不变, 而横向荷载很大。为此, 本文采用竖向荷载和横向荷载分开加载, 以便更好模拟于桥台桩基。

该试验选取截面尺寸为 16 mm(外径) × 2 mm(壁厚) 的合金铝管作模型试桩, 桩长分别为 800, 900, 1000, 1100 mm 四种规格, 相应的长径比为 50, 56.25, 62.5, 68.75, 桩身每隔 100 mm 对称地粘贴一对应变片, 用以测定相应截面的应变值。模型箱尺寸为 1200 mm(长) × 600 mm(宽) × 1000 mm(高), 用木板制成, 角钢和扁铁加固, 砂箱内可同时埋置四根模型桩, 箱内填料为洗净筛选的匀质干砂, 实测不均匀系数 $C_u = 2.09$, 填砂时控制一定的落砂高度, 分层装填击实, 以保证装填密度一致。

试验前实测桩身抗弯刚度^[10], 地面处桩身水平位移如表 1 所示, 并以此位移值反算地基比例系数, 其计

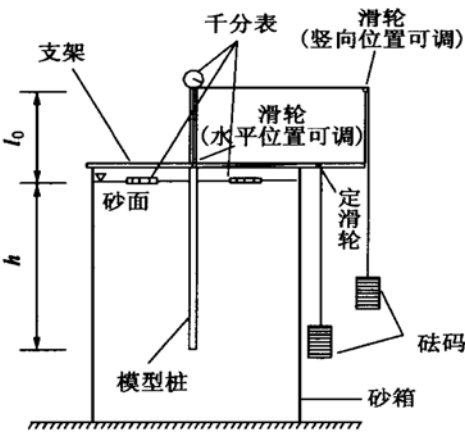


图 5 模型试验装置示意图
Fig. 5 Model test

算结果亦列于表 1。
试验时桩顶自由、无约束,如图 5 所示。桩的入土深度可根据需要任意调整,因试验桩的长径比较大,所有试桩均为柔性桩($\alpha h > 2.5$)。

试验采用慢速维持荷载法加载,整个加载装置如图 5 所示。桩身各截面的拉压应变值通过 YJ-26 型静态电阻应变仪量测,桩身抗弯刚度由材料力学弯曲理论求得。其结果如表 1。

4.2 计算与实测结果分析

根据材料力学弯曲理论,可求得试桩各测点处的弯矩,即

$$M = EI \frac{\varepsilon_t + \varepsilon_c}{d} \quad (5)$$

表 1 模型桩实测与计算结果比较

Table 1 The relation between calculated and measured result

桩号	桩长 /mm	抗弯刚度 /(kN·m ²)	入土深度 /mm	地基比例系数 /(kN·m ⁻⁴)	轴向荷载 /kN	横向荷载 /kN	砂面水平位移 /mm	桩身最大弯矩/(kN·m)		
								实测	计算	相对误差/%
1	800	0.189	640	142226	0.0756	0.2112	12.028	0.0517	0.0519	0.39
	800	0.189	630	128861	0.1008	0.1920	11.986	0.0511	0.0495	-3.13
	800	0.189	633	150841	0.1260	0.2112	11.886	0.0541	0.0534	-1.29
	800	0.189	638	193415	0.1512	0.2112	10.330	0.0512	0.0515	0.59
2	900	0.190	690	188318	0.0756	0.1728	9.711	0.0511	0.0496	-2.94
	900	0.190	695	123342	0.1008	0.1920	13.156	0.0558	0.0560	0.36
	900	0.190	705	192622	0.1260	0.1728	9.241	0.0484	0.0474	-2.07
	900	0.190	690	142409	0.1512	0.1728	11.154	0.0512	0.0511	-0.20
3	1000	0.190	770	116329	0.0756	0.1920	14.364	0.0604	0.0606	0.33
	1000	0.190	770	129104	0.1008	0.1728	12.278	0.0556	0.0544	-2.16
	1000	0.190	775	205372	0.1260	0.1920	10.729	0.0598	0.0579	-3.18
	1000	0.190	768	165253	0.1512	0.1728	10.922	0.0550	0.0542	-1.46
4	1100	0.187	840	116007	0.0756	0.1536	12.393	0.0527	0.0529	0.38
	1100	0.187	835	136288	0.1008	0.1536	11.584	0.0536	0.0533	-0.56
	1100	0.187	845	137385	0.1260	0.1728	12.702	0.0572	0.0584	2.10
	1100	0.187	838	134294	0.1512	0.1536	11.589	0.0529	0.0532	0.57

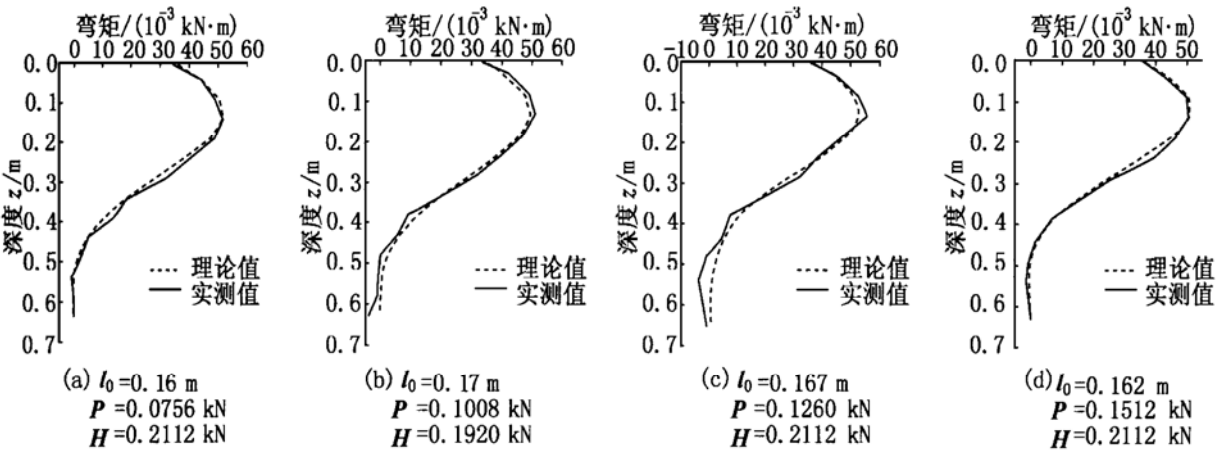


图 6 1 号桩在不同荷载组合下桩身弯矩

Fig. 6 The bending moment of pile No. 1 under different combination of loads

式中 d 为桩身外径(mm); EI 为桩身的抗弯刚度($\text{kN} \cdot \text{m}^2$); $\varepsilon_p, \varepsilon_t$ 为桩身各测点处的压、拉应变。而根据本文所编制的有限元—有限层程序可迅速求得桩身任意深度处的弯矩值, 各模型桩桩身最大弯矩值的理论值和实测值见表 1。

表 1 给出了上述试桩桩身最大弯矩值的实测与理论计算结果比较情况, 从表中可看出极限荷载下桩身最大弯矩相对误差均在 4% 以下, 一般在 $-3\% \sim 3\%$ 之间, 最小相对误差仅为 0.20%, 吻合极好。

本文还以 Origin5.0 工程绘图软件绘制出理论弯矩与实测弯矩值的比较分析图, 图 6 给出了 1 号模型桩在不同荷载组合下的比较分析图。

从图中可以看出, 用本文所提出的方法基本上能保证桩身各个断面的弯矩理论值和实测值相吻合, 而且, 桩身最大弯矩一般都发生在离地面以下 0.1 m 处左右。

5 结 语

(1) 本文提出的有限元—有限层法采用层状各向同性弹性半空间地基模型, 克服了文克尔地基模型的缺点, 因而更能反映桩土共同作用的实际情况。它可以方便地考虑土的层状构造、各向异性以及近似地考虑地基土的非线性特性, 与有限元法相比, 其输入数据、占用存储单元和运算时间都大大减少。

(2) 考虑到土的非线性性质, 有限元—有限层法可以对不同大小的荷载选用不同的变形模量, 因此可克服因荷载大小产生的计算精度影响, 而优于其他方法。它一般可以保证桩身各个断面的弯矩与实测值都比较接近。

(3) 本文设计了能很好模拟桥台桩实际工作状态的室内模型试验, 此类试验在国内鲜有报导。

(4) 尽管本文解答已初步得到室内模型桩试验的验证, 但模型试验研究将有待进一步深入。如桩侧不同土质、考虑承台以及不同桩材、桩径的影响等。

(5) 尽管本文采用的层状各向同性弹性半空间地基模型, 可近似地考虑地基土的非线性, 但地基模型可作进一步的深入, 以便更好地考虑土体的非线性、弹塑性、粘弹性、剪胀性等。

参考文献:

- [1] [日] 横山幸满. 桩结构物的计算方法和计算实例[M]. 唐业清, 吴庆荪译. 北京: 中国铁道出版社, 1984.
- [2] 赵明华. 轴向和横向荷载同时作用下的桩基计算[J]. 湖南大学学报, 1987, 14(2): 68~81.
- [3] 赵明华, 吴 鸣. 桥梁桩基计算与检测[M]. 北京: 人民交通出版社, 2000.
- [4] 龚晓南. 土塑性力学[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 1990.
- [5] 张问清, 赵锡宏, 宰金珉. 任意力系作用下的层状弹性半空间的有限层分析方法[J]. 岩土工程学报, 1981, 3(2): 27~42.
- [6] 宰金珉, 宰金璋. 高层建筑基础分析与设计[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1994.
- [7] Cheung Y K. 结构分析的有限条法[M]. 谢秀松, 王贻荪, 等译. 北京: 人民交通出版社, 1980.
- [8] 赵明华, 侯运秋, 曹喜仁. 倾斜荷载下基桩的受力研究. 湖南大学学报[J], 1997, 24(2): 98~102.
- [9] 彭文祥, 赵明华. 成层地基中倾斜荷载作用下桩的受力研究[J]. 中南公路工程, 1999, 24(1): 27~30.
- [10] 卢世深, 林亚超. 桥梁钻孔桩试验[M]. 北京: 人民交通出版社, 1980.

更 正

本刊 2001 年第 2 期版权页上的期刊基本参数末项* 2001- 02 系* 2001- 03 之误, 特此更正, 并向读者致歉!

(本刊编辑部)