支护结构水平位移分析研究

施建勇　周智勇　赵维炳　　刘永新
（南京河海大学岩土工程研究所，210098）　（连云港市交通工程建设总公司，222001）

提　要　本文利用弹性地基梁法对支护结构侧位移和支撑内力进了计算分析，对计算中的关键参数——土体弹性抗力系数进行了现场的旁压试验，并由试验得到抗力系数随侧位移变化的关系曲线，试验结果在现有资料的经验值范围内，计算的支护结构响应也较接近于工程实验结果。

一　前　言

在我国深基坑工程相关技术问题的研究已有很长时间的积累，也取得了不少有实用价值的研究成果。其中极限平衡理论仍是目前深基坑支护结构设计的主要方法之一，该法可给出工程师们所熟悉的计算结果，故为广大工程技术人员所接受。但极限平衡理论在对土压力的计算假设上与实际情况有较大的差距，此外，极限平衡方法在支护结构的水平位移计算分析方面仍有不足，因此以极限平衡理论为基础的设计方法仍有需进一步完善之处。为了解决支护结构的内力大小和分布计算，支护结构的水平位移预测并同时考虑支护结构与其后土体相互作用特性问题，弹性力学有限元法被很多的研究者用于深基坑工程的分析研究，该法不仅可以计算支护结构的内力、支护结构的水平位移，还可以计算支护结构后地表的沉降规律和影响范围，为工程设计提供了较全面的参考信息，但由于有限元计算方法比较繁琐，计算所需的参数较多，计算模型的选择在一定程度上影响着计算的最终结果，而且计算结果不能给出工程界所熟悉的安全度的数值，因此目前有限元法还仅用于对工程设计结果的进一步佐证，其直接用于工程设计的路还很长。为了避免上述两种方法的不足，弹性地基梁法被用于深基坑开挖支护结构的设计，该法可根据支护结构位移的大小确定作用于支护结构上的土压力，计算结果可给出相应的安全系数，计算较为简便，目前较多的商用程序都将这一方法作为软件的主要功能进行编制，因此有较广阔的工程应用前景。但在弹性地基梁法中，地基土的弹性抗力系数 m 是最重要的计算参数，可由有关规范查取，有一些不确定因素影响 m 的选取，进而影响计算结果。本文重点研究了弹性抗力系数的现场测试，同时进行了相关的分析计算。

二　测定弹性抗力系数 m 的现场试验研究

在实际工程中，随着开挖的加深，支护结构有向坑内位移的趋势，引起对坑内土体的挤压，与此同时坑内土体对支护结构的反力也由静止土压力开始逐渐增大。根据支护结构

的上述工作特性，采用旁压试验来模拟这一过程，并计算出土体的弹性抗力系数 m。

旁压试验是一个轴对称的圆柱形孔在受到径向均布压力作用后，孔壁土体向外扩张的试验。大量的试验表明，旁压试验的压力与孔壁土被压缩体积的关系曲线(p-v)可分成恢复段、弹性段和塑性段，其中弹性段是试验所关心的重点。图 1 是江苏省国投大厦深基坑工程现场旁压试验的 p-v 曲线图。

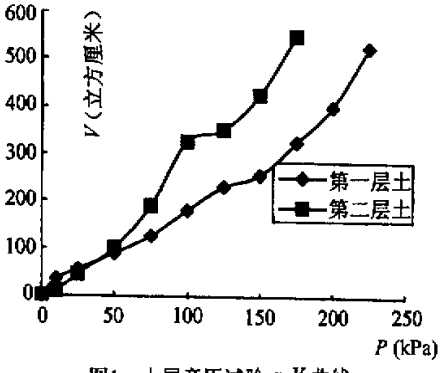


图1　土层旁压试验 p-V 曲线

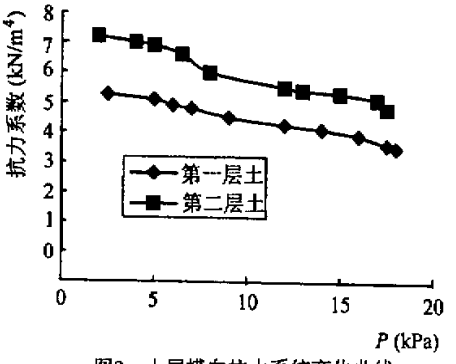


图2　土层横向抗力系统变化曲线

根据有关推导可整理出土层横向抗力系数随侧向位移变化曲线，见图 2。根据现有的规范，本次试验确定弹性抗力系数位于正常取值区间内，试验结果是比较合理的。

三　支护结构的位移和内力求解方法

由力矩平衡微分方程得到支护结构的弯曲微分方程为

$$\begin{cases} EI\dfrac{d^4y}{dx^4} = B\cdot\eta\sqrt{K_a}\left(\sqrt{K_a}\cdot\gamma\cdot x - 2c\right) - B\left[p_0 + mxy\right] & \text{(坑底面以下)} \\ EI\dfrac{d^4y}{dx^4} = B\cdot\eta\sqrt{K_a}\left(\sqrt{K_a}\cdot\gamma\cdot x - 2c\right) - E_s y_s A / DS & \text{(支撑处)} \end{cases}$$

式中，EI 是支护结构的抗弯刚度；y 是支护结构的挠度；B 是计算宽度，可取为桩的间距；η 是土压力修正系数；Ka 为主应力土压力系数，按朗肯土压力理论计算；γ 是土的容重；c 是土的凝聚力；p_0 是静止土压力；E_sA 是支撑的抗压刚度，y_s 是支撑处支护结构的水平挠度，D 是支护结构的计算长度，S 是支撑与支护结构接触作用的竖直长度。

该微分方程可用差分法求得支护结构的位移，再利用相关公式求出支护结构的内力。

四　工程实例分析

由江苏省国际投资公司兴建的国投大厦南依长江路，西临估依廊路，主楼为 28 层，

裙楼 4 层，总占地面积约 4000m²，基坑开挖深度为 9.5~12.0m。支护结构采用 ϕ800 间距 0.9m 的灌注桩加两道 ϕ610×12 钢管撑，防渗采用 ϕ700 搭接 20cm 的深搅桩，基坑截面图见图 3。

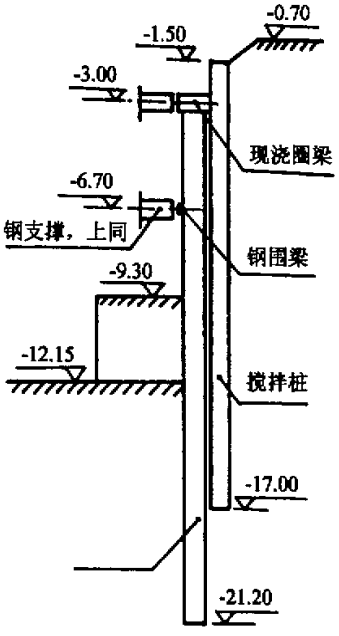


图3 基坑结构剖面图

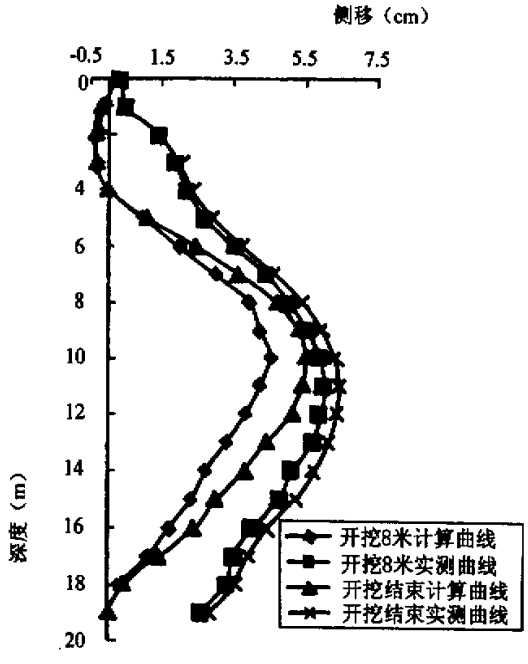


图4 支护结构侧向位移对比图

对开挖到 8.0m 和 9.0 深两个工况，计算所得的支护结构水平位移与监测结果对比如图 4 所示，最大位移和支撑内力的计算结果如表 1。

表 1 不同开挖深度计算结果

开挖深度（m）	计算最大位移（cm）	第一道支撑轴力（kN）		第二道支撑轴力（kN）	
8.0m	4.38	187.54	543.77*	136.15	289.44*
9.0m	5.56	227.78	514.23*	136.29	302.56*

注：带“*”者为监测结果。

图 4 中计算的支护结构侧位移比较紧近于实测结果，但与实测结果仍有一些差距。应该说弹性地基梁法求解支护结构的受力和位移仍有难以合理模拟真实情况之处，其中弹性抗力系数 m 的外推也有待进一步论证，造成计算结果与实测值有一定的差异也是正常的。表 1 列出了计算的支撑内力和实测结果的对比，实测值比计算值大，这是因为实际工程中的支撑是角撑，不是对面撑，因此实测结果要大一些。

五 结 语

弹性地基梁法比极限平衡理论法计算较为合理，比有限单元法计算较为简便，能计算出工程建设关心的支护结构的位移和内力，计算中的弹性抗力系数及其与土体侧向位移的关系可由旁压试验测得。抗力系数的测试结果在现有资料所列数值范围内是合理的。将所测抗力系数用于一实际工程的计算分析，计算结果较接近实测数据。同时由于弹性地基法难以完全模拟工程实际情况，该法的进一步应用将有很多问题需要深入研究。

参考文献

[1] 刘建航，侯学渊主编：《基坑工程手册》，北京，中国建筑工业出版社，1995。

[2] Whittle, A. J. Analysis of deep excavation in Boston. Journal of Geotechnical Engineering. Vol. 119, No. 1, 1992.

[3] Simpson, B. Retaining structures: Displacement and Design. Geotechnique. Vol. 42, No. 4, 1992.

[4] 谭跃虎，吉同琦：《软土深挖基坑中挡墙侧向变形分析与计算》，见《岩土工程学报》，Vol. 17, No. 4, 1995.

[5] 周智勇：《深基坑开挖支护结构水平位移安全预报》，[学位论文]，河海大学，1999年1月。