

考虑固结、土-结构相互作用的基坑开挖有限元分析

Finite element analysis of foundation pit excavation with consideration of consolidation and soil-structure interaction

高俊合

(深圳市市政工程总公司基础公司, 深圳, 518034)

赵维炳

(河海大学岩土工程研究所, 南京, 210098)

周成

(南京水利科学研究所土工所, 南京, 210024)

中图法分类号 TU 473.2

作者简介 高俊合, 男, 1970 年生, 1998 年在河海大学获岩土工程博士学位, 现为深圳市市政工程总公司基础公司工程师。主要从事软土特性与地基基础工程、环境岩土工程的设计、施工及科研工作。

1 前言*

深基坑有限元分析方法可以较全面地考虑多种复杂因素的影响, 因而越来越受到重视。但目前有限单元法计算精度太低, 致使该方法仍处在辅助设计水平上。其原因是多方面的^[1], 其中固结及土-结构相互作用的模拟过于粗糙是两个不容忽视的因素。前人已对这 2 个因素进行过一些研究^[2], 但仍未能取得令人满意的进展。本文开展了这 2 个方面的研究, 以推动基坑支护工程设计理论的发展。

2 固结有限元分析

2.1 自由面处理

基坑开挖固结有限元方程就是水流项以总水头表示的 Biot 固结方程^[2]。本文只介绍有限元计算中自由面的处理方法。由于降水引起的基坑外侧水面——自由面是变化的, 如何处理一直是固结有限元分析的难点。笔者依据渗流理论, 采用试算法^[2]调整自由面及附近单元, 并推导了四边形等参元(见图 1)结点水量交换表达式如下:

$$F_l = \frac{\mu L_1}{6\Delta t} [2(h_l^0 - h_l) + (h_i^0 - h_i) + W_i + W_l] + \frac{\mu L_2}{6\Delta t} [2(h_l^0 - h_l) + (h_m^0 - h_m) + W_l + W_m] \quad (1)$$

式中 $L_1 = [(x_i - x_l)^2 + (y_i - y_l)^2]^{\frac{1}{2}}$; $L_2 = [(x_l - x_m)^2 + (y_l - y_m)^2]^{\frac{1}{2}}$; F_l 为 l 点总的渗透量; μ 为给水度; h_i, h_l, h_m 为该时段结点水头; h_i^0, h_l^0, h_m^0 为上一时段结点水头; W_i, W_l, W_m 为结点竖向补给量; x_i, y_i 为 i 点的纵横坐标, 其它类似。

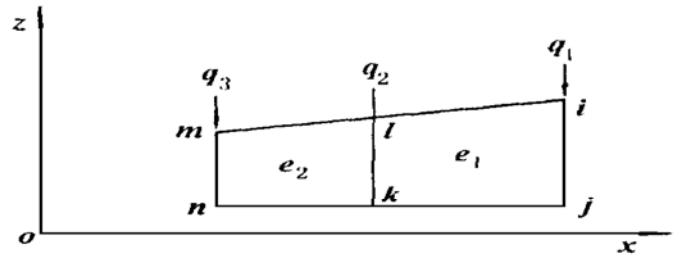


图 1 自由面边界

Fig. 1 Boundary of free surface

2.2 实例分析

(1) 实例概况

某基坑开挖深 9.8 m, 0~ - 2.0 m 放坡, 以下分二级开挖, 即 - 2.0~ - 6.0 m 和 - 6.0~ - 9.8 m, 土层及支护结构剖面见图 2。经研究可作平面问题处理, 以简化计算^[2]。

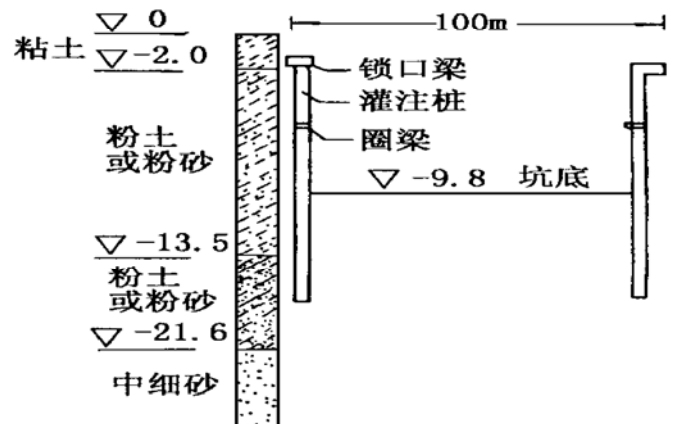


图 2 某基坑土层及支护结构剖面图

Fig. 2 Geological profile and retaining structure of the foundation pit

(2) 有限元分析

采用 4 种方案对比分析来说明固结影响机理。方

案一(总应力法),采用三轴固结不排水剪指标,不考虑固结。方案二(总应力法),采用三轴固结排水剪(简称 CD)指标,即只考虑固结引起的土体强度增长,不考虑固结过程(即不考虑渗流)。方案三(有效应力法),采用 CU 指标,不考虑固结引起的土体强度增长,仅考虑渗流,自由面以上,通过调整土体容重及强度指标 c, φ 来反映渗流影响;自由面以下,将渗透力作为体积力施加在土骨架上^[2]。方案四考虑固结,采用 CD 指标。事实上,方案二和方案三只是为便于研究固结机理而采用的假想状态。土体本构关系采用邓肯模型,有关参数见表 1。锁口梁和圈梁可简化为弹簧处理^[2],其弹性系数分别为 5.418 MN/m 和 4.800 MN/m。

表 1 计算参数
Table 1 Calculating parameters

土层	CU					
	γ	φ	c	R_f	K_{ur}	n_{ur}
粉土	19.2	27.0	12.4	0.98	388	0.69
砂土	19.9	28.3	10.0	0.98	718	0.28

土层	CD								
	γ	φ	c	R_f	K_{ur}	n_{ur}	G	F	D
粉土	9.4	35.1	23.5	0.85	556	0.76	0.36	0.22	5.28
砂土	10.1	36.1	6.5	0.75	850	0.50	0.39	0.03	6.02

注: γ 单位: kN/m^3 ; φ 单位: $(^\circ)$; c 单位: kPa

(3) 计算成果分析

4 种方案计算的桩体水平位移、地面沉降值及土压力分布分别见图 3~ 5。方案二和方案三都是假想情况,文中列出以供支护结构设计参考。图 5 着重分析方案一和方案四的计算土压力分布状况。

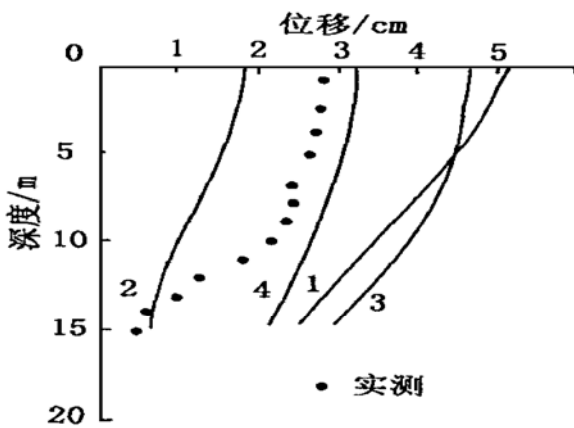


图 3 4 种方案计算桩体水平位移对比

Fig. 3 Comparison of pile lateral displacements calculated by four methods

图 3~ 5 中表明,方案一(不考虑固结)的计算桩体水平位移偏大,地面沉降也较大,相应地,主动土压力减小也较大,被动土压力增加则较多。方案二,仅考虑固结引起的土体强度增长而不考虑固结过程,即不考虑渗流,计算桩体水平位移和地面沉降偏小。方案三和方案

四的计算值较接近实测值,而以方案四效果最佳。这是因为方案三虽然没有考虑固结的影响但考虑了渗流,使自由面以上土中的水排出,因而土体强度有所提高,相应地,桩体水平位移也是较小的;但由于产生了渗透压力,使位于开挖面以下的桩体水平位移明显偏大。方案四考虑了固结(变形-渗流的耦合),从而使土体强度提高,土体变形减小,则桩体水平位移也就减小。同时,由于又考虑了渗透压力引起的桩体底部位移增大,所以,总的效果是,桩体水平位移介于方案二和方案三之间。

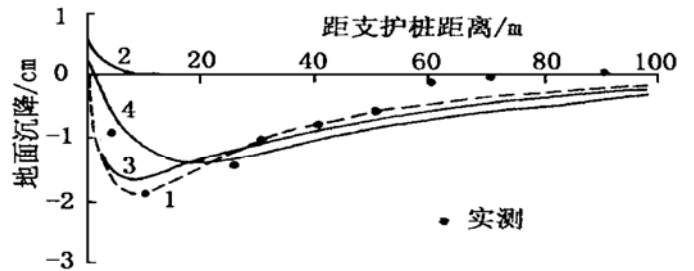
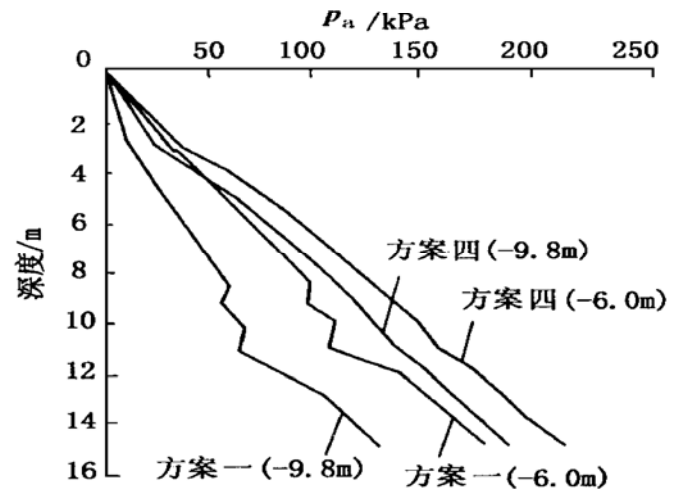
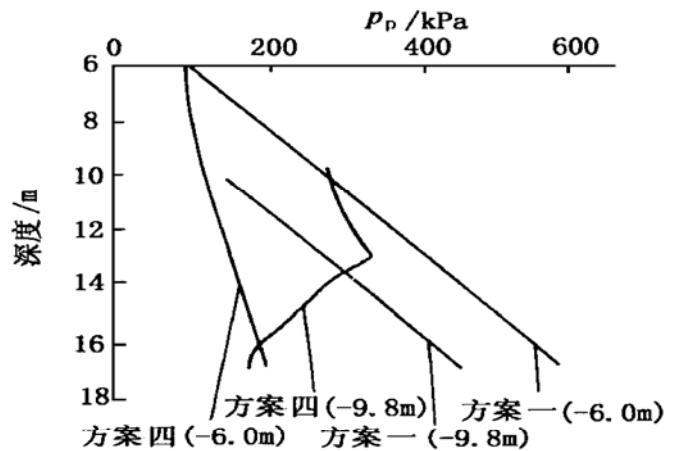


图 4 4 种方案计算地面沉降对比

Fig. 4 Comparison of ground settlement calculated by four methods



(a) 主动土压力



(b) 被动土压力

图 5 方案一与方案四计算主、被动土压力对比

Fig. 5 Comparison of active and passive earth pressure calculated by method I and method IV

方案四, 由于渗流使主动侧土体产生渗透压密, 使桩体上部附近土体位移较方案一小。但由于桩体下部受较强的渗透压力, 故其位移亦较大。该方案的主动土压力则较方案一大。同时, 又由于渗流使被动侧土体产生向上的浮力, 故土抗力减小, 尽管因桩体底部的位移较大, 使被动侧土抗力较方案一有所增加, 总的效果是土抗力比方案一小。可见, 渗流的存在使主动土压力不能随着开挖从静止土压力开始有效地减小, 而被动土压力却因浮力而减小, 所以对支护结构的受力及变形稳定最不利。因此考虑变形- 渗流耦合的分析方法, 是偏于安全的, 这与常规设计方法中水、土、土计算的结论是一致的。

3 土- 支护结构相互作用分析

前面的计算都是在不设置接触面单元的情况下进行的, 仅就计算的桩体位移而言是较接近实测值的, 但还存在如下 2 个问题^[2]: ①不论是否考虑固结, 计算的桩身弯矩远大于实测值, 尤其是负弯矩(指向坑外)很大, 这显然是不合理的; ②靠近支护桩附近地面沉降比实测值小, 而远离桩体处却比实测值大。

导致这些问题的出现可能是因为没有考虑桩- 土相互作用。为此, 仍采用上述实例以 3 种计算方案对比说明。方案一, 桩- 土间不设置接触面单元; 方案二, 桩- 土间设置 Desai 单元^[2]; 方案三, 桩- 土间设置笔者提出的剪切滑移薄层单元(SSTL Element)^[2]。土体本构关系仍采用邓肯模型, 并考虑固结。方案二和方案三的桩- 土接触面参数见表 2, 其它有关参数见前文。

表 2 土- 混凝土接触面单元参数

Table 2 Parameters of soil- concrete interface element						
土层	Desai 单元参数					
	$\varphi(^{\circ})$	$c(\text{kPa})$	R_f	k_{sl}	n	
粉土	30.0	2.70	0.45	1140.0	0.72	
粉砂	35.0	6.53	0.31	948.3	0.84	
土层	剪切滑移薄层单元参数					
	G_i	R_f	k_v	n	a_0	a_1
粉土	58.6	0.51	1680	1.10	5.44	137.9
粉砂	80.0	0.40	2000	0.80	7.50	160.0

图 6 和图 7 分别是 3 种方案计算的地面沉降和弯矩(按等值梁法计算)对比。图 6, 7 中表明, 不设接触面单元, 即认为桩土是一个连续体, 二者之间不存在滑移、错动, 因而变形是连续的; 而设置了接触面单元, 较好地模拟了桩- 土滑移及土体的变形, 与实际相符。另外, 不设置接触面单元无法考虑剪力对桩身内力的影响, 以致于不设置接触面单元使计算的主动土压力偏大, 而被动土压力则更大, 致使计算的弯矩偏大, 尤其是负弯矩很大。

可以看出, 设置接触面单元考虑桩- 土相互作用使计算结果更趋合理。2 种接触面单元(本文剪切滑移单元和 Desai 单元)相比, Desai 单元的计算值偏大, 而本文提出的剪切滑移薄层单元较接近实际。

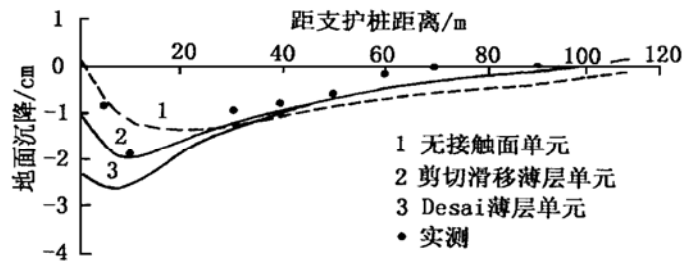


图 6 计算地面沉降(标高- 9.8 m)

Fig. 6 Calculated ground settlement(- 9.8 m)

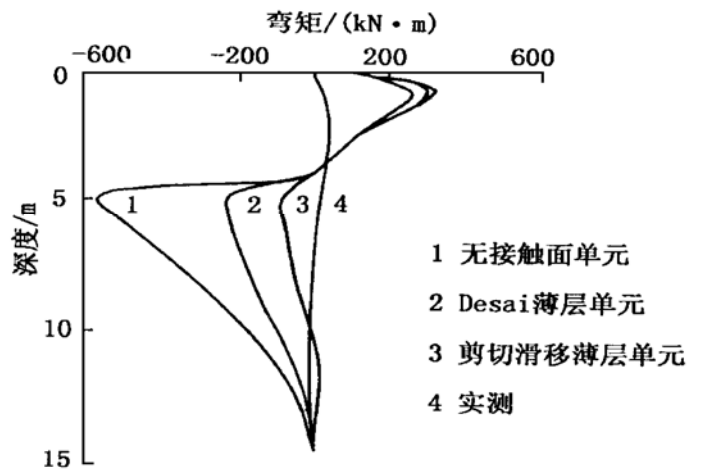


图 7 计算桩体弯矩(标高- 6.0 m)

Fig. 7 Calculated pile bending moment(- 6.0 m)

4 结 语

(1) 基坑支护采用有限元进行数值分析, 当有渗流发生时, 宜采用考虑固结的分析方法。

(2) 考虑土- 结构相互作用可使基坑有限元分析精度明显提高。而土- 结构之间设置不同接触面单元分析精度也不同, 以笔者提出的剪切滑移薄层单元精度较高。

(3) 本文考虑固结、土- 结构相互作用的数值分析方法, 克服了经典土压力理论的不足, 可以有效地分析基坑开挖过程中渗流、水平位移、地面沉降及坑底隆起等因素间的相互影响, 为基坑支护从“被动制约机制”走向“主动防御机制”奠定了良好的理论基础。

参 考 文 献

- 高俊合, 赵维炳, 施建勇. 土体非线性影响的深基坑支护研究综述. 水利水电科技进展, 1997, 17(4): 14~ 17
- 高俊合. 深基坑支护结构设计理论研究: [博士学位论文]. 南京: 河海大学, 1998