

文章编号: 1000-7598-(2007) 增刊-0677-05

渗流条件下基坑水-土压力不同计算方法的比较

董 诚, 郑颖人, 唐晓松

(后勤工程学院 军事土木工程系, 重庆 400041)

摘 要: 地下水渗流一直是基坑工程研究中的难点和热点。近年来, 一些学者基于自己的研究成果分别提出了渗流条件下基坑水-土压力的计算方法(统称传统方法)。另外, 岩土有限元软件 PLAXIS 则通过渗流-应变耦合来计算渗流条件下的水-土压力。结合工程算例, 比较了当前基坑工程中传统水-土压力计算方法与 PLAXIS 程序的计算结果, 发现由于部分计算假定与实际情况不符, 导致传统水-土压力计算方法存在一定误差; 提出了传统水-土压力计算方法的适用条件, 并指出真实的水力条件下, PLAXIS 程序考虑渗流-应变耦合得到的水-土压力计算结果是合理可信的。

关 键 词: 渗流; 基坑开挖; 水-土压力; PLAXIS; 渗流-应变耦合

中图分类号: TU 432

文献标识码: A

Comparsion of earth pressure and water pressure between varied calculation methods with seepage

DONG Cheng, ZHENG Ying-ren, TANG Xiao-song

(Datapment of Civil Engineering, Logistical Engineering University, Chongqing 400041, China)

Abstract: Seepage is always a difficult point and a hot topic. In recent years, some scholars have put forward calculation methods of earth pressure and water pressure(called convention methods) on retaining structure with seepage based on their research findings. In addition, the finite element program PLAXIS can calculate earth pressure and water pressure on retaining structure through seepage flow-strain coupling. The article compares calculation results between convention methods and PLAXIS, then finds there are definite errors in calculation results because their assumptions differ from the fact. And the article analyses applied condition of invention methods and points out that earth pressure and water pressue with PLAXIS are appropriate and believable under true waterpower conditions.

Key words: seepage; deep foundation excavation; earth pressure and water pressure; PLAXIS; seepage flow-strain coupling

1 前 言

当前, 岩土工程界对于基坑工程中渗流条件下的水-土压力的计算有以下 3 个思路:

(1) 不考虑渗流的影响, 只考虑静水压力的影响。如《建筑基坑支护技术规程》^[1]中对碎石土和砂土采用的“水-土压力分算法”, 对粉土和黏性土采用的“水-土压力合算法”; 另外, 杨晓军等^[2]也分析了在软黏土深基坑开挖中采用“水-土压力合算法”的合理性。

(2) 通过对地下水渗流的影响, 改进了传统的库仑土压力计算方法, 提出了新的水-土压力计算公式。王钊等^[3]总结和分析了在静水压力、稳定渗

流和超静水压力作用下, 挡土结构上水土压力的计算方法, 通过实例说明了水-土分算与水-土合算结果的差异及考虑水的渗流作用和超静水压力作用对挡土结构上总压力作用的影响。汤连生等^[4]考虑基坑地下水渗流的影响, 提出了考虑地下水渗透力的水-土压力计算新公式。

(3) 采用岩土有限元软件通过流-固耦合来考虑渗流对土压力的影响。目前, 常用的软件有 PLAXIS、Midas 和 FLAC 等。

从上述前人所作的工作可以看出, 关于渗流条件下的基坑水-土压力的计算方法主要有“水-土压力分算法”、“水-土压力合算法”、考虑渗透力的水-土压力计算法和考虑流-固耦合的有限元法。本文将

对比不同计算方法水-土压力的计算结果,来研究各种计算方法的误差和对不同土的适用性。

2 传统计算方法简介

限于篇幅,本文主要针对不同方法的计算结果的比较,故对通用方法的理论基础不做过多的阐述。

2.1 不考虑渗流的水-土压力计算方法

《建筑基坑支护技术规程》^[1]提出的水平荷载标准值计算公式:

(1) 对于碎石土和砂土:

地下水位以上,有:

$$e_{ajk} = \sigma_{ajk} K_{ai} - 2c_{ik} \sqrt{K_{ai}} \quad (1)$$

地下水位以下,有:

$$e_{ajk} = \sigma_{ajk} K_{ai} - 2c_{ik} \sqrt{K_{ai}} + \left[(z_i - h_{wa}) - (m_j - h_{wa}) \eta_{wa} K_{ai} \right] \gamma_w \quad (2)$$

(2) 对于粉土及黏性土:

$$e_{ajk} = \sigma_{ajk} K_{ai} - 2c_{ik} \sqrt{K_{ai}} \quad (3)$$

式中:参数定义见文献[1]。以下简称该方法为方法1。

2.2 考虑渗透力的水-土压力计算新公式

王钊等^[3]绘制流网计算渗透力和水压力,假设墙附近的渗透力都是竖直方向的,即墙后渗流向下的,墙前向上;然后用朗肯土压力公式结合渗透力来计算土压力:

$$\text{墙前: } P_p = (\gamma' - i\gamma_w) z K_p \quad (4)$$

$$\text{墙后: } P_a = (\gamma' + i\gamma_w) z K_a \quad (5)$$

计算水压力:

$$u_i = \gamma_w \left(z_i - H \frac{N_i}{N} \right) \quad (6)$$

式中:参数定义见文献[3]。以下简称该方法为方法2。

3 PLAXIS 程序渗流-应变耦合分析

在PLAXIS程序中采用水-土分算法,通过定义地下水水头,执行地下水渗流程序计算得到单元应力点上的孔隙水压分布,然后根据孔隙水压确定单元点的土体饱和度。孔隙水压是压力水头与水的重度的乘积,压力水头由渗流分析中得到的全水头减去位置水头而得。然后,在单元应力点求得土压力和孔隙水压力之和,从而完成渗流-应变耦合分析过程。

另外,PLAXIS 程序对于非排水状态的土能够根据基坑开挖过程考虑孔隙水压力消散的过程。

4 三种分析方法计算结果的比较

为了对比渗流条件下针对不同土的3种分析方法计算结果的差异,本算例分别选用了砂土、粉质黏土和淤泥质黏土作为研究对象。为了简化分析过程,本算例采用均质土。

算例:均质土的土体参数见表1。补给水源在距基坑50 m处,基坑深6 m;坑外水位保持在地表处,坑内水位随开挖下降,始终在开挖面以下。采用地下连续墙支护结构,挡墙总高18 m(见图1),埋入深度达到12 m,主要是为了保证PLAXIS 程序计算过程中土体不垮塌。

表1 土体参数
Table 1 Soil properties

参数	淤泥质黏土	砂质粉土	砂土
重度/ $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$	16.6	18.1	19
渗透系数 $K_x / \text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$	7.74×10^{-6}	6.24×10^{-4}	2.2×10^{-3}
渗透系数 $K_y / \text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$	7.74×10^{-6}	6.24×10^{-4}	2.2×10^{-3}
弹性模量 $E_{\text{ref}} / \text{kPa}$	8 000	20 000	70 000
泊松比 ν	0.3	0.3	0.33
凝聚力 c / MPa	14	4.0	0
内摩擦角 $\phi / (^\circ)$	10.5	27.5	30

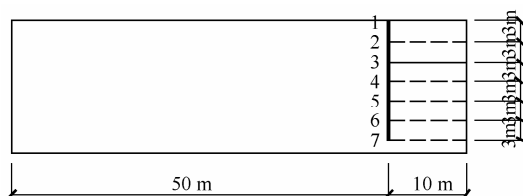


图1 基坑开挖示意图

Fig.1 The cross-section of deep foundation

4.1 运用 PLAXIS 程序进行渗流-应变耦合分析的几点说明

(1) 土的本构关系采用摩尔-库仑准则。

(2) 土体排水状态的设定。PLAXIS 程序可以设定排水和不排水两种状态。二者的区别主要在于:排水状态下的土体没有考虑孔隙水压力消散过程对土体抗剪强度和弹性模量的影响,在计算中可以直接采用三轴不排水试验的结果进行土压力计算,方法1和方法2均采用该方法;但是对于软黏土而言,不考虑孔隙水压力消散与实际不符,特别是基坑开挖过程中,往往施工速度较快,施工时间较短,导致软黏土的孔隙水压力都没有完全消

散。鉴于方法 1 和方法 2 均没有考虑孔隙水压力消散的影响, 而且工程界对孔隙水压力的消散对土压力的影响存在较大的争议, 故本文假定土体为排水状态。

(3) 水力条件的确定。对于 PLAXIS 软件而言, 流-固耦合计算结果的准确性主要取决于水力条件的合理选取。水力条件主要包括: 补给水源的位置、基坑深度与过水面(挡墙下端到不透水层的距离)高度比、降水方式以及降水速度等。本文根据某工程的地勘资料确定补给水头位于距基坑 50 m 处, 过水面高度为 7 m; 降水方式为基坑内排水。

(4) 浸润线的确定。在 PLAXIS 程序中首先定义初始条件下土体各节点的水头, 然后采用剩余流量法来确定浸润面, 最后采用固定网格法进行渗流和固结的耦合计算。PLAXIS 程序认为, 浸润面以下的土体含水率为 100%, 浸润面以上的土体的含水率从 100% 逐渐减小到 0。

4.2 计算结果的比较和分析

3 种分析方法的计算结果分别见表 2~4 和图 2~4, 表中的 E_a 为墙后、墙前水-土压力之和。

表 2 砂土的水土压力(单位: kPa)

Table 2 Earth pressure and water pressure of sand(unit: kPa)

点号	PLAXIS		方法 1		方法 2	
	E_a	E_p	E_a	E_p	E_a	E_p
1	0	0	0	0	0	0
2	40	0	39	0	32	0
3	80	0	78	0	69	0
4	124	144	108	111	93	83
5	163	173	138	222	129	166
6	206	190	168	333	155	249
7	263	245	198	444	186	331

表 3 粉质黏土的水土压力(单位: kPa)

Table 3 Earth pressure and water pressure of silty clay(unit: kPa)

点号	PLAXIS		方法 1		方法 2	
	E_a	E_p	E_a	E_p	E_a	E_p
1	0	0	0	0	0	0
2	40	0	15	0	31	0
3	80	0	35	0	62	0
4	127	127	35	160	94	69
5	169	147	35	308	125	139
6	208	177	35	455	156	209
7	254	236	35	603	187	278

表 4 淤泥质黏土的水土压力(单位: kPa)

Table 4 Earth pressure and water pressure of silt soil(unit: kPa)

点号	PLAXIS		方法 1		方法 2	
	E_a	E_p	E_a	E_p	E_a	E_p
1	0	0	0	0	0	0
2	28	0	11	0	41	0
3	73	0	45	0	82	0
4	117	103	45	105	123	46
5	159	151	45	177	164	93
6	194	176	45	249	205	139
7	252	240	45	321	245	185

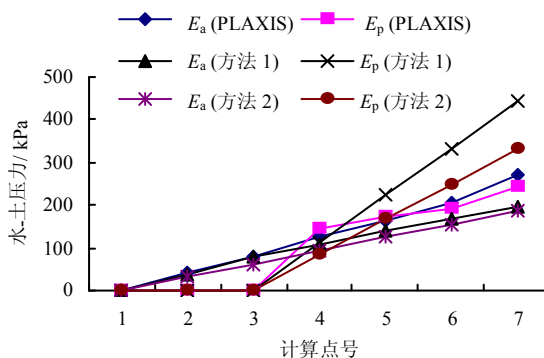


图 2 砂土的水-土压力分布图

Fig.2 Earth pressure and water pressure distribution of sand

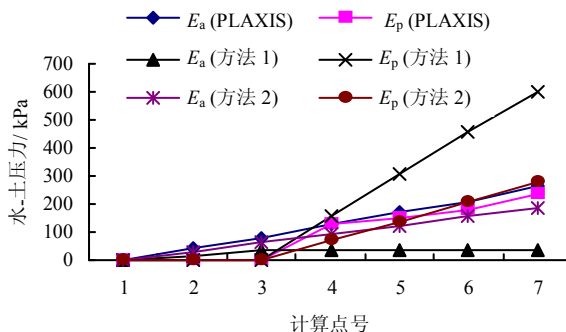


图 3 粉质黏土的水-土压力分布图

Fig.3 Earth pressure and water pressure distribution of silty clay

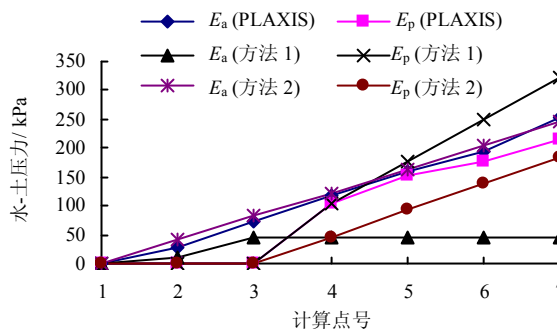


图 4 淤泥质黏土的水-土压力分布图

Fig.4 Earth pressure and water pressure distribution of silt soil

从表 2~4 可以发现如下规律:

(1) 墙后水-土压力

对于砂土而言, 方法 1 和方法 2 的计算结果较为接近, 误差大概在 10 % 左右。而 PLAXIS 程序计算结果却比它们大得多, 这主要是由于方法 1 和 2 的计算假定与实际不符造成的, 他们均假定挡墙向基坑位移, 从而采用主动土压力公式计算墙后土压力; 而从 PLAXIS 程序的挡墙变形图 (见图 5) 来看, 挡墙下端的位移很小, 只有 2 cm 左右, 远未达到产生主动土压力的条件 ($0.5 H$, H 为挡墙高度)^[5], 故此处的土压力应该采用静止土压力公式计算。以 7 点为例, 主动土压力和静止土压力的差值约为 59 kPa, 而 PLAXIS 程序与方法 2 计算结果的差值为 65 kPa。因此, PLAXIS 的计算结果应该与实际情况更接近。

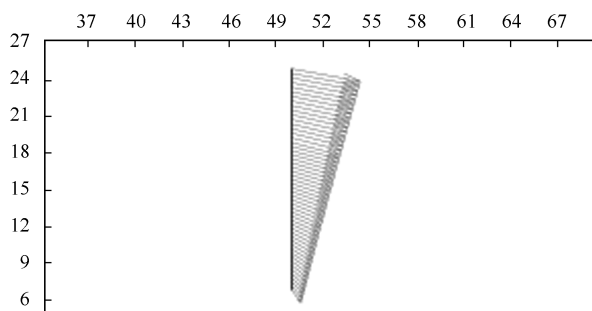


图 5 挡墙的位移图

Fig.5 Displacement of retaining wall

对于粉质黏土而言, 由于方法 1 假定基坑开挖面以下土压力对墙后土压力无影响, 故方法 1 基坑开挖面以下各点的水-土压力均小于方法 2 和 PLAXIS 程序的计算结果。而方法 2 与 PLAXIS 程序计算结果的差异也主要是因为方法 2 假定墙后土压力为主动土压力而不是静止土压力。

对于淤泥质黏土而言, 方法 1 的计算假定同粉质黏土, 故基坑开挖面以下各点的水土压力均小于方法 2 和 PLAXIS 程序的计算结果。PLAXIS 程序计算得到的挡墙下端位移约为 7.9 cm, 已经达到了产生主动土压力的位移值^[5] ($1 \% \sim 2 \% H$), 故 PLAXIS 程序与方法 2 的计算结果非常接近, 误差在 3 % 左右。

从图 2~4 可以看到, 除了方法 1 外, 墙后水-土压力基本呈倒三角形分布。

(2) 墙前水-土压力

对于砂土而言, 方法 1 计算结果偏大, 主要原因有两个: 一是按照被动土压力系数计算土压力, 导致土压力偏大; 二是在计算过程中将静水压力直

接作用到挡墙上, 没有考虑流网对水压力计算的影响。方法 2 和 PLAXIS 程序计算结果的比值为 1.35。而文献[3]中也明确提出: 由于墙前填土没有达到被动极限状态, 故在工程设计中, 通常将方法 2 计算得到被动土压力除以 1.1~1.5 的折减系数后再进行计算。因此, PLAXIS 程序计算得到的墙前水-土压力是符合工程实际要求的^[6-10]。

对于粉质黏土而言, 方法 1 计算结果失真, 方法 2 与 PLAXIS 程序的计算结果较为吻合^[11]。

对于淤泥质黏土而言, 方法 1 和 PLAXIS 程序的计算结果较为吻合 (比值为 1.33)。而方法 2 的计算结果偏小, 主要是因为方法 2 没有考虑凝聚力 c 对土压力的影响, 对于 c 值较大而 ϕ 值较小的软黏土, 其计算结果有较大误差, 而杨晓军等^[2]也认为在软黏土深基坑开挖中采用“水-土压力合算法”是合理的。

从图 2~4 可以看到, 墙后水-土压力基本呈倒三角形分布。

(3) 墙后水-土压力和墙前水-土压力的比较

有学者认为, 传统水-土压力的计算方法 (包括方法 1 和方法 2) 的墙后水-土压力是主动土压力, 而墙前水-土压力是被动土压力。通过对计算结果的分析, 可以发现这种认识是片面的, 只有当挡墙达到产生主动土压力和被动土压力的位移值, 传统的计算结果才比较准确。另外, 传统方法很难准确地计算被动土压力

方法 1 计算得到的黏土在基坑开挖面下的墙后水-土压力偏小, 而墙前水-土压力偏大。在运用《建筑基坑支护技术规程》^[1]的 (4.1.1-1) 式计算地下连续墙的嵌固深度设计值时, 会导致计算结果偏于不安全。

5 结 论

本文结合算例, 比较了渗流条件下 3 种水-土压力的计算方法, 得到以下结论:

(1) 《建筑基坑支护技术规程》^[1]提供的计算方法: 对砂土而言, 计算结果较为合理; 而对黏土而言, 墙前水-土压力偏大, 墙后水-土压力偏小, 在计算地下连续墙的嵌固深度时, 计算结果偏不安全。

(2) 计算挡墙的土压力前, 应先判断挡墙的位移是否满足主动土压力或被动土压力的位移条件^[5], 而不能主观地认为墙前土压力为被动土压力, 墙后土压力为主动土压力。

(3) 在设定了合理的水力条件后, PLAXIS 程

序的考虑渗流-应变耦合计算水土压力的计算结果是合理可信的。

(4) 王钊等^[3]提出的渗流条件下的水-土压力计算公式对砂土和粉质黏土较为适用; 而对于淤泥质黏土(软黏土), 墙前水-土压力的计算结果偏小, 此时可采用水-土合算法。

参 考 文 献

- [1] JGJ120-99, 建筑基坑支护技术规程[S].
- [2] 杨晓军. 基坑开挖中考虑水压力的土压力计算[J]. 土木工程学报, 1997, 30(4): 58—62.
YANG Xiao-jun. Calculation of earth pressure on excavation considering pore water pressure[J]. **China Civil Engineering Journal**, 1997, 30(4): 58—62.
- [3] 王钊. 挡土结构上的土压力和水压力[J]. 岩土力学, 2003, 24(2): 146—150.
WANG Zhao. Earth pressure and water pressure on retaining structure[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2003, 24(2): 146—150.
- [4] 汤连生. 考虑地下水渗流的基坑水土压力计算新图式[J]. 岩土力学, 2004, 25(4): 565—569.
TANG Lian-sheng. A new calculation chart of water-earth pressure on foundation pit considering ground water seepage[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 25(4): 565—569.
- [5] 陈希哲. 土力学地基基础(第三版)[M]. 北京: 清华大学出版社, 1998.
- [6] 李广信. 基坑支护结构上水土压力的分算与合算[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(3): 348—352.
- [7] 刘继国, 曾亚武. FLAC^{3D}在深基坑开挖与支护数值模拟中的应用[J]. 岩土力学, 2006, 27(3): 505—508.
LIU Ji-guo, ZENG Ya-wu. Application of FLAC^{3D} to simulation of foundation excavation and support[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 27(3): 505—508.
- [8] Abdallah I. Evaluation and rehabilitation of dam seepage problems, a case study [J]. **Engineering Geology**, 2000, 56(3~4): 335—345.
- [9] 唐晓松, 郑颖人, 邬爱清, 等. 应用 PLAXIS 有限元程序进行渗流作用下的边坡稳定性分析[J]. 长江科学院院报, 2006, (4): 13—16.
TANG Xiao-song, ZHENG Ying-ren, WU Ai-qing, et al. Stability analysis of soil slope under seepage by PLAXIS finite element program[J]. **Journal of Yangtze River Scientific Research Institute**, 2006, (4): 13—16.
- [10] 俞洪良, 陆杰峰, 李守德. 深基坑工程渗流场特性分析[J]. 浙江大学学报(理学版), 2002, 29(5): 595—600.
YU Hong-liang, LU Jie-feng, LI Shou-de. Study of seepage field characteristics of foundation pit excavation[J]. **Journal of Zhejiang University (Science Edition)**, 2002, 29(5): 595—600.
- [11] PLAXIS 中文用户手册[CP/OL].