

文章编号:1671-6833(2005)02-0076-05

考虑开挖反弹的桩锚结构土压力计算方法研究

王立明¹, 郭院成², 周同和³

(1. 同济大学地下与建筑工程系, 上海 200092; 2. 郑州大学土木工程学院, 河南 郑州 450002; 3. 郑州大学综合设计研究院, 河南 郑州 450002)

摘 要: 桩锚支护结构中, 土压力的计算未考虑支护结构位移及坑底土体的卸载反弹影响, 可导致主动区土压力计算值偏小, 被动区土压力计算值偏大, 降低支护结构的安全度水平. 以弹性长桩理论和经典土压力理论为基础, 考虑施工过程中坑底土体开挖反弹效应和土的短期应力历史, 研究桩锚支护结构土压力的演化进程和计算方法, 提出了土压力的“反零点分布”模式、“零分布”模式、“零点分布”模式、“梯形分布”模式以及“矩形分布”模式之间的相关关系及其影响因素和演化机制. 指出桩锚支护结构土压力的计算应综合考虑开挖速度、各工况暴露时间以及土体反弹特性的影响.

关键词: 岩土工程; 基坑; 土体反弹; 短期应力历史; 桩锚支护结构; 土压力; 暴露时间

中图分类号: TU 476⁺.4

文献标识码: A

0 引言

排桩或桩锚支护结构是基坑工程中常用的支护型式. 在支护结构的稳定性和安全性设计中, 土压力的计算问题是最基本问题. 当排桩可视为刚性桩时, 墙后土压力分布情况较为简单, 而将其视为弹性桩时, 桩两侧的土压力分布情况则比较复杂, 我国目前现行规范^[1]中土压力的计算未考虑桩体结构的弹性影响以及土体开挖反弹效应, 使桩外主动区土压力的计算值与实际值相比偏小, 而桩内被动区土压力的计算值偏大, 可导致支护结构的稳定性安全系数被高估. 本文作者以弹性长桩理论为基础, 研究桩锚支护结构考虑开挖过程影响时的土压力计算方法.

1 弹性长桩理论

1.1 桩侧荷载的确定^[2,3]

单桩承受水平荷载作用时, 近似地将土体视为线形变形体, 并忽略桩土之间的摩擦力对水平抗力的影响以及邻桩的影响, 则可认为深度 z 处的水平抗力 q_x 等于该点的水平抗力系数 k_x 与该

点的水平位移 x 的乘积, 即 $q_x = k_x \cdot x$. 地基水平抗力系数 k_x 通常有以下 4 种计算方法.

(1) 常数法: 假定地基抗力系数沿深度不变, 为一定值: $k_x = k_h$;

(2) “ k ”法: 假定在桩身第一挠曲零点以上按凹抛物线变化, 以下为常数;

(3) “ m ”法: 假定 k_x 随深度正比例增加, 即 $k_x = mx$;

(4) “ c 值”法: 假定水平抗力系数 $k_x = cz^{0.5}$ (c 为比例常数, 随土类不同而异).

实测资料表明, “ m ”法(当桩的水平位移较大时)和 c 值法(当桩的水平位移较小时)比较接近实际, 本文采用“ m ”法进行研究.

1.2 挠曲微分方程及桩的内力分布特征^[3]

根据材料力学中梁的挠曲微分方程可得:

$$EI \frac{d^4 x}{dz^4} + mb(x) = 0, \text{ 其中 } x \text{ 为桩的水平位移; } z \text{ 为}$$

桩的竖向坐标(向下为正); b_0 为桩的截面计算宽度; EI 为桩的刚度. 可求出桩身各截面的内力和位移以及土的水平抗力(如图 1 所示). 弹性支点法就是在此基础上建立起来的.

收稿日期: 2005-01-28; 修订日期: 2005-03-20

基金项目: 河南省自然科学基金资助项目(0211063200)

作者简介: 王立明(1970-), 男, 河南省焦作市人, 同济大学博士研究生, 高级工程师, 主要从事基坑支护结构的优化设计和变形控制技术研究.

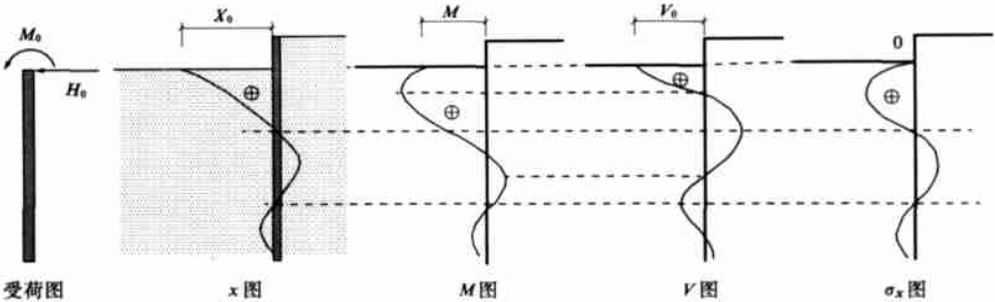


图1 单桩的挠度 x 、弯矩 M 、剪力 V 和水平抗力 σ_x 的分布曲线示意图

Fig.1 Distribution graph of horizontal deformation , moment ,shearing force and horizontal resistance

2 土压力与位移关系的表达式

如图2所示,土压力和位移的关系可以用以下式子来描述^[4,3]:

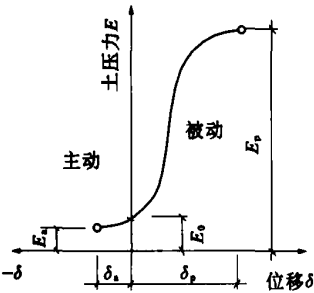


图2 位移和土压力的关系

Fig.2 The relation between displacement and earth pressure

$$\sigma_a = \sigma_0 + \sin \left[\frac{\pi}{2} \cdot \frac{\delta}{\delta_{acr}} \right] (q_{acr} - \sigma_0);$$
$$q_p = \sigma_0 + \sin \left[\frac{\pi}{2} \cdot \frac{\delta}{\delta_{per}} \right] (q_{per} - \sigma_0),$$

其中: q_{acr} 为主动土压力; q_{per} 为被动土压力; q_{per} 为土体主动极限位移; δ_{per} 为土体被动极限位移; δ 为土体实际位移,取正值; σ_a 为土体主动变形产生的土压力; q_p 为土体被动变形产生的土压力; σ_0 为静止土压力.该两式可统一为一个表达式:

$$\sigma = \sigma_0 + \sin \left[\frac{\pi}{2} \cdot \frac{\delta}{\delta_{cr}} \right] (q_{cr} - \sigma_0).$$

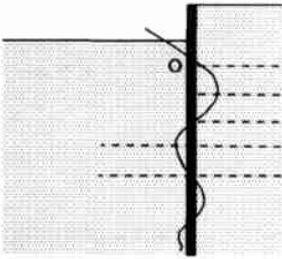


图3 长桩水平位移示意图

Fig.3 Horizontal displacement sketch of long pile

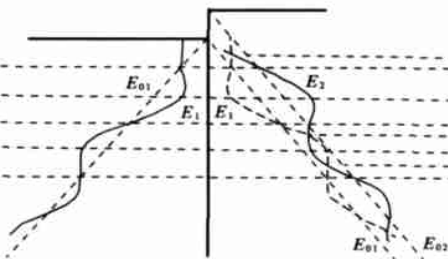


图4 静止土压力及实际土压力示意图($t = \infty$)

Fig.4 Sketch of stationary soil pressure and actual soil pressure ($t = \infty$)

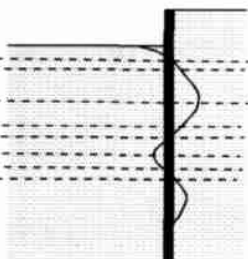


图5 长桩水平荷载示意图

Fig.5 Horizontal load sketch of long pile

3 桩锚支护结构土压力的研究

3.1 长桩两侧静止土压力、实际土压力、长桩水平位移以及长桩水平荷载的对应关系^[6,7]

根据弹性长桩理论:在支护桩的坑底以下部分(如图1所示),深度大于某一较大值时,桩体的水平位移、桩所承受的荷载、桩的内力(包括弯矩和剪力)都将趋近于零.而根据土压力理论可知:当桩体水平位移为零时,其两侧土压力均为静止土压力,如图4所示. E_{01} 为桩左侧静止土压力线; E_1 为桩左侧实际土压力线;右侧虚线是 E_1 关于长桩的镜像复制; E_{02} 为桩右侧静止土压力线; E_2 为桩右侧实际土压力线; t 为基坑某一工况开挖后的暴露时间.

由图3~5易知:

(1) 长桩水平位移为零的点有多个,其左右两侧土压力均为静止土压力,因此这些点处桩的水平荷载(土压力之差)并不为零(设第一个水平位移为零的点为 O 点,如图3所示).

(2) 桩水平荷载为零的点有多个,第一个点必位于 O 点之上.

(3) 随深度的增加,实际土压力线逐渐收敛于静止土压力线,长桩的水平荷载将逐渐接近桩两侧的静止土压力之差,该值由基坑深度决定且

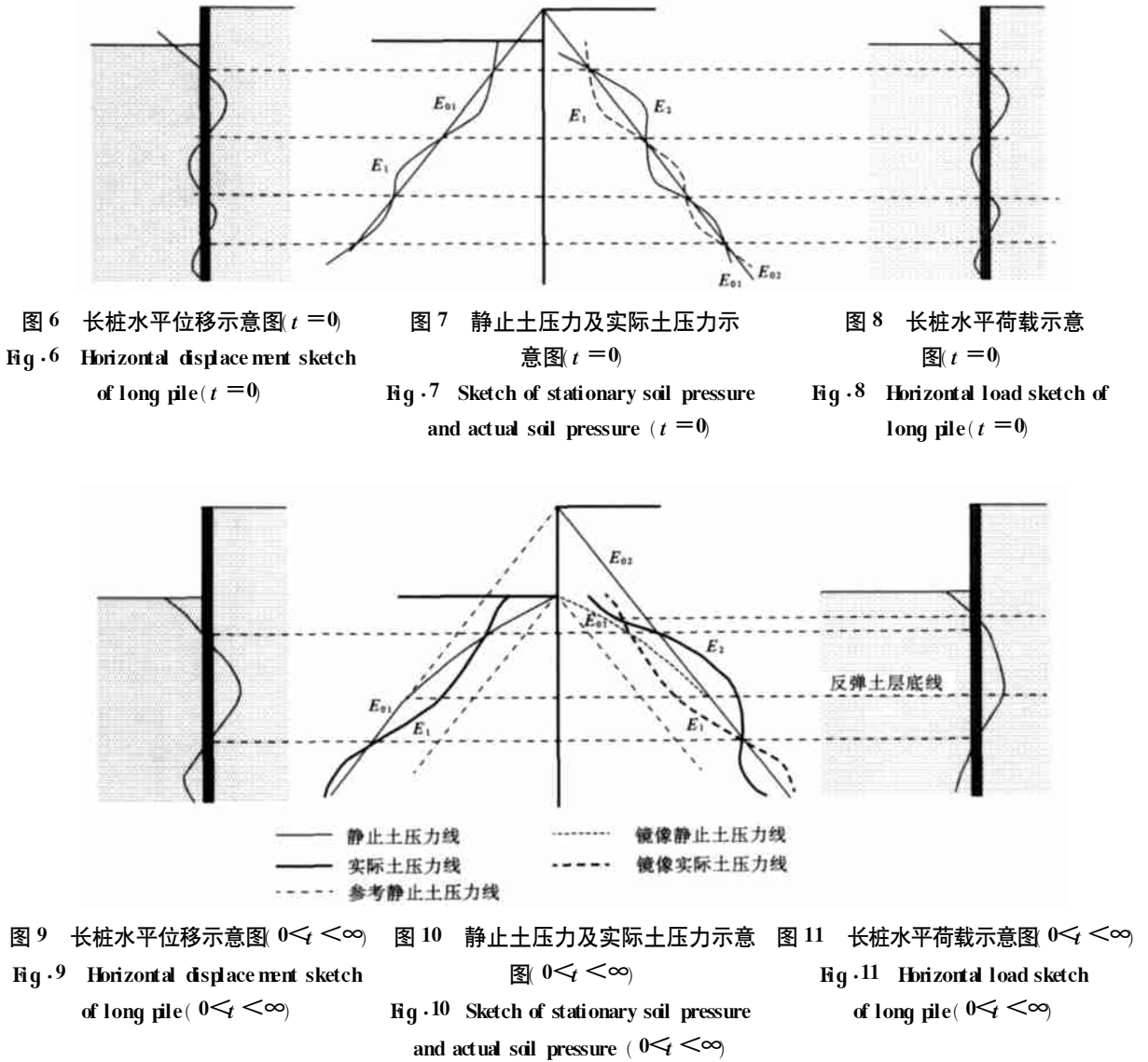
为一定值,但这与上所弹性长桩理论明显矛盾.为解决这一矛盾,引入土的短期应力历史的概念:假定基坑中的土为正常固结土且在瞬间被全部拿去,坑底以下的土将保持原有的应力水平,类似于超固结土.其水平位移见图 6,静止土压力线见图 7,应与桩右侧相同,长桩水平荷载见图 8,此时土压力为零的点也就是水平位移为零的点.同一深度处,图 7 所示的桩左侧静止土压力值明显大于图 4 所示的值.并且由此可知,由于桩左侧坑底土的类超固结性质,其在短期提供的主动土压力值和被动土压力值将明显大于将其视为正常固结土时的值.这种差别将随着基坑开挖深度的增加而愈加显著,而随暴露时间的增加而趋于缓和.

随着暴露时间的增长,坑底土体由于持续反弹而快速卸荷,土体中的弹性应变能也随之释放,反弹土层深度逐渐加大.长桩水平位移见图 9.如

图 10 所示,易知在反弹土层的底界面上下的静止土压力的变化应该是渐变的,因此反弹土层内的静止土压力线应为光滑曲线且是上凸的.水平荷载见图 11.

对比分析图 4、图 7 和图 10 中的静止土压力线和实际土压力线,可得如下结论:

(1) 图 4 中的实际土压力线未考虑土的短期应力历史,也未考虑卸荷后的土体反弹效应,相当于基坑暴露时间无限长的状态;图 7 中的实际土压力线考虑土的短期应力历史,但未考虑卸荷后的土体反弹现象,为卸荷瞬间的土压力状态,即某一工况的初始土压力状态;图 10 中的实际土压力线既考虑了土的短期应力历史,又考虑了卸荷后的土体反弹现象,最接近真实的土压力状态,称为某一工况中的某一时段的实际土压力状态.假定桩外侧土体不受桩内侧坑底土反弹的影响.



由图 7、图 10 中可以看到,随着基坑开挖后暴露时间的增长,坑内侧静止土压力线在反弹土层内变为曲线(即静止土压力系数是一个变量),长桩的零荷载点与零位移点分离且向上作相对移动.在土体的反弹土层范围内,零位移点并不是零荷载点;而在该范围以外,零位移点就是零荷载点.由图 4~图 10 可以推断出:①零荷载点原先在零位移点,当坑底土反弹后,只有在桩内侧土体的被动区,也同时是桩外侧的主动区,才能找到土压力相等的点——零荷载点.②位于反弹土层内的桩,相邻的两个零位移点相对于反弹前位置的竖向移动方向相反,相邻两个零荷载点的位置相对于零位移点的移动方向相反.第一个零荷载点相对于第一个零位移点向上移动.

(3) 由图 7、图 10 中可知,在坑底以下,当反弹土层底线达到桩的水平位移为零的点之前,零荷载点即零弯矩点.据此可以将单支点桩锚支护结构简化为图 12 所示的计算模型:下端铰支座位置即坑底以下桩的水平位移为零的点;上端水平弹簧即为预应力锚杆的简化模型.

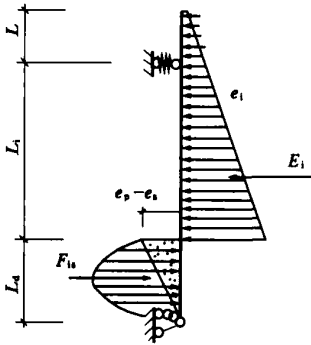


图 12 单支点桩锚支护结构上压力与荷载示意图($t=0$)

Fig. 12 Sketch of soil pressure and load of single fulcrum pile-anchor retaining structure ($t=0$)

3.2 单支点桩锚支护结构土压力及等效荷载的研究

坑底以上桩外侧的土压力随着支护结构的水平位移由静止土压力向主动土压力变化,该位移幅值一般为工程所允许.因此,可将坑底以上的桩外侧土压力按主动土压力来考虑.

坑底以下桩两侧的土压力分布模式是随着坑底土体暴露时间、坑底土体反弹程度而逐渐变化的.土体反弹具有这样两个特点:①上层土体的反弹程度大于下层土体;②下层土体的反弹滞后于上层土体.

因此可以将某一工况下作用在坑底以下桩体上的荷载(在时间 $t=0$ 时的瞬间)看作弹性长桩理论“ m ”法的计算结果与一个三角形荷载的叠加,如图 12 中阴影部分所示,可称为反零点土压力分布模式.随着坑底土体的反弹,三角形荷载逐渐消失,如图 13(a) 所示,在时间 $t=t_1$ 时,支护结构上的荷载相当于桩内侧弹性长桩理论“ m ”法计算得到的抛物线形分布的土压力与桩外侧零分布模式下的土压力的代数和;坑底土体进一步反弹,桩内侧土压力进一步减少,如图 13(b) 所示,在时间 $t=t_2$ 时刻,支护结构上的荷载相当于“ m ”法计算得到的抛物线形分布的土压力与桩外侧零点分布模式下的土压力的代数和;当坑内土体反弹土层底线超过原来的零荷载点(亦即零位移点)时,零位移点和零荷载点将会分离,如图 13(c) 所示,在时间 $t=t_3$ 时,支护结构上的荷载相当于“ m ”法计算得到的抛物线形分布的土压力与桩外侧梯形分布模式下(并进一步向矩形分布模式转化)土压力的代数和.

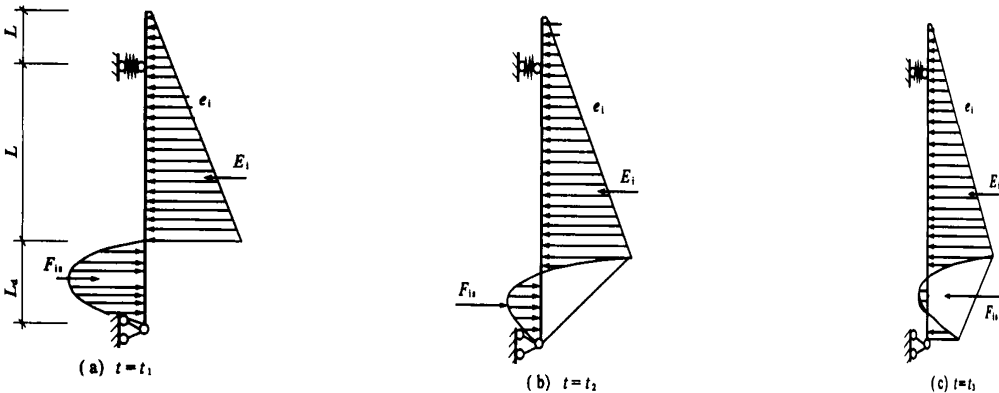


图 13 土压力零分布模式下支护结构受荷示意图

Fig. 13 Load sketch of retaining structure with the zero soil pressure distribution mode

图 12~15 中 5 种土压力模式可分别定义为:土压力“反零点分布”模式、“零分布”模式、“零点分布”模式、“梯形分布”模式和“矩形分布”模式。反映了支护结构在同一工况下不同时间段所经历的受荷模式,其转换过程均受制于坑底土体的反弹特性。

4 结束语

深基坑支护中的施工效应问题主要包括时间效应和空间效应,作者所讨论的单支点桩锚支护结构土压力分布及等效荷载的 5 种模式,比较具体地反映了深基坑支护的时间效应过程。在具体的工程设计中,有关土压力及等效荷载模式的选择,应综合考虑土体的反弹特性(如反弹深度、反弹速度、反弹程度等)和基坑开挖速度、某工况暴露时间等方面因素,甚至同一工况的不同时刻也需要采用不同的模式。当然,具体运用还需要做很多工作。

一般来讲,由于基坑开挖后总有一段暴露时间,所以针对开挖瞬间的第一种分布模式,仅是研

究的需要,偏离于实际而不宜采用。另外,模式的采用也可以根据不同的土性特点:比如,在相同的暴露时间内,砂土比粘性土反弹速度快,因此应采用后几种模式。

参考文献:

- [1] JGJ 120—99,建筑基坑支护技术规程[S]。
- [2] 华南理工大学,东南大学,浙江大学,等.地基及基础[M].北京:中国建筑工业出版社,1998。
- [3] 黄强.建筑基坑支护技术规程应用手册[M].北京:中国建筑工业出版社,1999。
- [4] 张吾渝,徐日庆,龚晓南.土压力的位移和时间效应[J].建筑结构,2000,30(11):54~57。
- [5] 刘红军,贾永刚.深基坑支护设计的弹性抗力有限元法[J].青岛海洋大学学报,1999,(2):37~41。
- [6] 郭院成,王立明,曾力.基于位移控制的单支点桩锚支护结构的优化设计[J].郑州大学学报(工学版),2004,25(4):4~7。
- [7] 王立明.单支点桩锚支护结构的变形计算及变形控制的反演分析[D].郑州:郑州大学,2004。

Study on the Calculation Method of Earth Pressure for Pile-anchor Bracing Structure Considering the Excavation-rebounding Effect

WANG Li-ming¹, GUO Yuan-cheng², ZHOU Tong-he³

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. School of Civil Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450002, China; 3. Comprehensive Designing Institute, Zhengzhou University, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: In pile-anchor bracing structure, the deformation of bracing structure and the unload-rebounding effect of the bottom soil were not taken into consideration in the calculation of earth pressure in the past, which might cause a lower calculation value of earth pressure in the active zone and the larger calculation value of earth pressure in the passive zone, and the safety level of bracing structure will be undervalued. On the basis of elastic long pile and classical earth pressure, both the evolution process and computation method of earth pressure for pile-anchor bracing structure are studied in this paper, considering both the excavation-rebounding effect and short-term stress history for the earth in the bottom of foundation pit during construction, and the “counter-zero point distribution pattern”, “zero distribution pattern”, “zero point distribution pattern”, “trapezoidal distribution pattern”, “rectangular distribution pattern”, and the correlation relationship in between, influencing factors and evolution mechanism are also presented. In this paper, it is also pointed out that the excavation speed, the exposure time for all cases and the influence of earth rebounding properties should be comprehensively taken into consideration in the computation of earth pressure for pile-anchor bracing structure. The computation method of earth pressure proposed in this paper provides a theoretical guide to some extent for the displacement calculation and deformation control during construction for pile-anchor bracing structure.

Key words: rock and soil engineering; foundation pit; soil layer rebound; short-term stress history; pile-anchor retaining structure; soil pressure; exposure time