

基坑开挖中土压力计算模型探讨

姜志强 孙树林 李 磊

(河海大学土木工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 根据土压力与位移关系的一般特征, 将基坑支护结构上的土压力与位移的关系用双曲线来表示, 推导了考虑位移变化影响的土压力计算公式. 该公式描述了土压力随位移变化的非线性特征, 公式中控制参数可以结合室内试验方便地得到.

关键词: 土压力; 位移; 松弛应力; 挤压应力; 双曲线模型

中图分类号: TU433 文献标识码: A 文章编号: 1000-198X(2003)03-0303-04

土压力是作用于支护工程的主要荷载, 特别在大型基坑的开挖中能较正确地估计土压力是进行基坑工程合理设计和顺利施工的前提, 也是确保工程安全性和经济性的基础. 在计算基坑开挖的土压力时, 由于基坑开挖工程的特点, 当土体进入极限平衡状态时, 尤其是被动极限平衡状态时所对应的位移往往是基坑中支护结构所不容许的, 因而极限土压力理论的弊端也显而易见了. 在土压力的计算中考虑其位移效应是十分必要的.

1 位移对土压力的影响规律

模型试验和原型观测均表明: 位移与土压力的关系曲线如图 1 所示^[1]. 土体的运动会产生位移, 也势必会引起水平方向土的应力松弛或增长. 因此定义, 由于土体的伸展产生应力松弛, 记松弛应力为 p_r ; 相应的由于土体的压缩产生应力增长, 记为 p_s . 土压力与位移的关系取决于松弛应力、挤压应力与位移的关系. 可以把土压力公式描述成下述形式^[2]:

主动土压力
$$p_a = p_0 - p_r \tag{1}$$

被动土压力
$$p_p = p_0 + p_s \tag{2}$$

式中 p_0 为静止土压力 kPa.

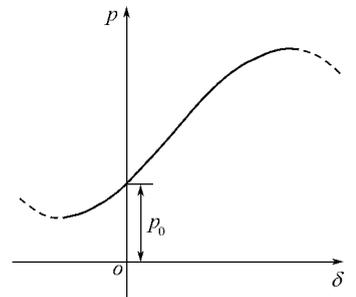


图 1 位移与土压力关系曲线
Fig.1 Displacement versus earth pressure

2 位移土压力模型

2.1 模型简图及假定

根据土压力随位移变化的一般特征(如图 1 所示), 引用 Winkler 地基模型的部分假设, 将支护结构两侧的土体用相互独立的非线性弹簧模拟, 在极限位移范围内, 土压力按双曲线规律从静止土压力分别向主动土压力和被动土压力变化, 当达到极限状态时, 土体弹簧即进入理想塑性状态(如图 2 所示).

2.2 公式推导

由公式(1)(2)可得到最大松弛应力: $p_{rmax} = p_0 - p_{acr}$; 最大挤压应力: $p_{smax} = p_{per} - p_0$. 其中 p_{acr} 为极限主动土压力, p_{per} 为极限被动土压力. 为了考虑位移与松弛应力、挤压应力的关系, 引入 F_a 和 F_p , 均为位移的函数, 记 $p_r = F_a p_{rmax}$; $p_s = F_p p_{smax}$, 则得

$$p_a = p_0 + F_a(p_{acr} - p_0) \tag{3}$$

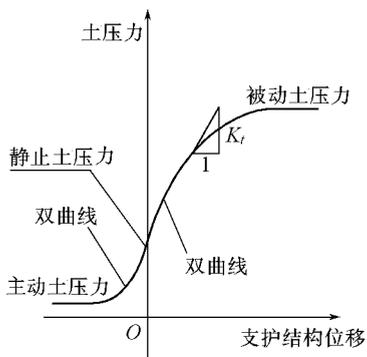


图2 位移土压力模型

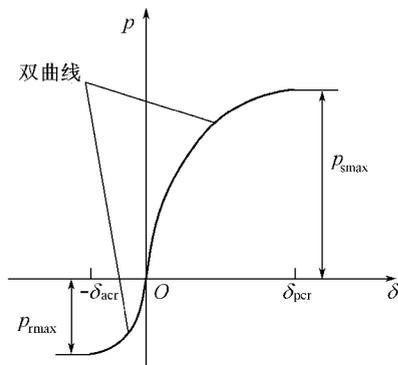


图3 松弛应力、挤压应力与位移的关系

Fig.2 Displacement-earth pressure model

Fig.3 Relaxation stress and squeezing stress versus displacement

$$p_p = p_0 + F_p(p_{pcr} - p_0) \tag{4}$$

为定量表示出 F_a, F_p 将松弛应力、挤压应力分别与位移的关系用双曲线来模拟,如图3所示.取位移向被动土压力发展时为正,则有

$$F_a = \frac{\delta}{c + m\delta} \quad -\delta_{acr} \leq \delta \leq 0 \tag{5}$$

$$F_p = \frac{\delta}{d + n\delta} \quad 0 \leq \delta \leq \delta_{pcr} \tag{6}$$

式中: c, m, d, n ——待定参数; $\delta_{acr}, \delta_{pcr}$ ——达到主动和被动极限状态时支护结构的位移量.显然,点(0,0)和(1, $-\delta_{acr}$)满足式(5),点(0,0)和(1, δ_{pcr})满足式(6),将这4点分别代入式(5)(6)经整理后再代入式(3)(4)得土压力表达式为

$$p = \begin{cases} p_{acr} & \delta < -\delta_{acr} \\ p_0 + \frac{\delta}{(m-1)\delta_{acr} + m\delta}(p_{acr} - p_0) & -\delta_{acr} \leq \delta \leq 0 \\ p_0 + \frac{\delta}{(1-n)\delta_{pcr} + n\delta}(p_{pcr} - p_0) & 0 \leq \delta \leq \delta_{pcr} \\ p_{pcr} & \delta > \delta_{pcr} \end{cases} \tag{7}$$

以被动区土压力为例,当支护结构位移在0到极限被动状态之间时,由式(7)可得

$$p_p - p_0 = \frac{\delta}{\frac{1-n}{p_{pcr} - p_0}\delta_{pcr} + \frac{n}{p_{pcr} - p_0}\delta} \tag{8}$$

令 $\frac{1-n}{p_{pcr} - p_0}\delta_{pcr} = A \quad \frac{n}{p_{pcr} - p_0} = B$

由式(8)得到 $A + B\delta = \frac{\delta}{p_p - p_0} \tag{9}$

某一深度被动区的切线水平基床系数

$$K = \frac{\partial p_p}{\partial \delta} = \frac{\partial (p_p - p_0)}{\partial \delta}$$

由式(9),当 $\delta \rightarrow 0$ 时

$$A = \left(\frac{\delta}{p_p - p_0} \right)_{\delta \rightarrow 0} \tag{10}$$

而 $\left(\frac{p_p - p_0}{\delta} \right)_{\delta \rightarrow 0}$ 表示为土压力与位移的关系曲线上(如图2)被动土压力段的初始切线斜率,即初始切线水平基床系数,记为 K_{pi} ,单位 kN/m^3 .因此

$$A = \frac{1-n}{p_{pcr} - p_0}\delta_{pcr} = \frac{1}{K_{pi}} \tag{11}$$

则
$$n = 1 - \frac{p_{per} - p_0}{K_{pi} \delta_{per}} \tag{12}$$

同理,对于主动区的土压力曲线(如图 2)按类似分析方法,可得

$$m = 1 + \frac{p_{acr} - p_0}{K_{ai} \delta_{acr}} \tag{13}$$

式中: K_{ai} 为土压力与位移的关系曲线上(如图 2)主动土压力段的初始切线水平基床系数, $K_{ai} \neq K_{pi}$,反映了在静止土压力状态土体水平加载和卸载性质的差异.基坑支护深度某点 K_{ai}, K_{pi} 的大小只取决于该点的静止土压力,是关于 p_0 的函数.借鉴邓肯-张模型^[3]中推导初始切线加载模量和回弹模量时的假定,设

$$E_{ai} = fp_{air} (p_0/p_{air})^u \tag{14}$$

$$E_{pi} = gp_{air} (p_0/p_{air})^v \tag{15}$$

式中: p_{air} ——大气压力,用以消除量纲影响; f, u, g, v ——待定参数; E_{ai}, E_{pi} ——对应于 K_{ai}, K_{pi} 的初始水平切线模量, kPa,二者同反映土体的变形刚度. Caspe^[4]在研究围护桩墙的侧向变形和基坑地表沉陷之间的关系时,将桩后土体分为受扰动区和不受扰动区.如图 4 所示,主、被动区土体分为扰动区和不受扰动区,其分界线和支护结构的夹角分别为 $\pi/4 - \varphi/2$ 和 $\pi/4 + \varphi/2$.扰动区的土体水平应变从桩体到分界面按线性减小,分界面处的水平应变为零.以被动区为例,设桩体位移 $\delta(h), h$ 为开挖面下某一深度,对应区域的水平应变 $\epsilon(x) = kx + b$,则由

$$\begin{aligned} \epsilon(x) &= 0 && \text{当 } x = (L - h) \tan(\pi/4 + \varphi/2) \\ &\int_0^{(L-h)\tan(\pi/4+\varphi/2)} (kx + b) dx = \delta(h) \end{aligned}$$

得桩体处的水平应变

$$\epsilon(h) = \frac{2\delta(h)}{(L - h) \tan(\pi/4 + \varphi/2)}$$

式中: L ——开挖面至桩底的长度; φ ——土体内摩擦角; k, b ——待定参数.

被动区初始水平切线模量

$$E_{pi}(h) = \left(\frac{p_p - p_0}{\epsilon(h)} \right)_{\epsilon \rightarrow 0} = \frac{(L - h) \tan(\pi/4 + \varphi/2)}{2} \left(\frac{p_p - p_0}{\delta(h)} \right)_{\delta \rightarrow 0}$$

则由式(10) (11) (15)得

$$K_{pi}(h) = \frac{2gp_{air} (p_0/p_{air})^v}{(L - h) \tan(\pi/4 + \varphi/2)} \tag{16}$$

经过同样类似的推导可得主动区初始切线水平基床系数

$$K_{ai}(h) = \frac{2fp_{air} (p_0/p_{air})^u}{(L - h) \tan(\pi/4 - \varphi/2)} \tag{17}$$

将式(16) (17)分别代入式(12) (13),再将式(12) (13)代入式(7),得到随位移变化的土压力计算公式

$$p = \begin{cases} p_{acr} & \delta < -\delta_{acr} \\ p_0 + \frac{K_{ai}(p_{acr} - p_0)\delta_{acr}\delta}{(p_{acr} - p_0)\delta_{acr} + (K_{ai}\delta_{acr} + p_{acr} - p_0)\delta} & -\delta_{acr} \leq \delta \leq 0 \\ p_0 + \frac{K_{pi}(p_{per} - p_0)\delta_{per}\delta}{(p_{per} - p_0)\delta_{per} + (K_{pi}\delta_{per} - p_{per} + p_0)\delta} & 0 \leq \delta \leq \delta_{per} \\ p_{per} & \delta > \delta_{per} \end{cases} \tag{18}$$

2.3 参数的试验确定

对于式(14) (15)中的参数 f, u, g, v 可用室内三轴试验确定.为模拟现场条件,该试验是基于 k_0 固结的侧向加、卸载应力路径试验.类似于邓肯-张模型中用常规三轴试验确定初始切线模量表达式中参数的方法,参数 f, u, g, v 的值可在双对数坐标上分别点绘 $\lg(E_{ai}/p_{air}) \sim \lg(p_0/p_{air}), \lg(E_{pi}/p_{air}) \sim \lg(p_0/p_{air})$ 的关系,近似为直线, $\lg f, \lg g$ 分别为两直线的截距, u, v 分别为斜率.

3 结 语

基坑支护结构上的土压力计算是一个相当复杂的问题,根据土压力与位移关系的一般特征,详细推导了

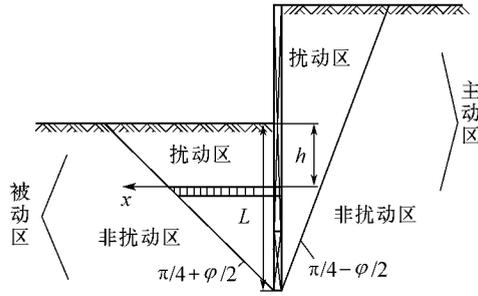


图4 土体水平应变分区

Fig.4 Partitioning of horizontal earth strain

可反映土压力随位移非线性变化的土压力公式,公式中的控制参数可以结合室内试验方便地得到,从而避免了依赖现场实测资料确定参数的不便,对进一步探讨土压力的计算方法有一定的实用价值.

参考文献:

- [1] 龚晓南. 深基坑工程施工设计手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1998. 77—78.
- [2] 徐日庆. 考虑位移和时间的土压力计算方法[J]. 浙江大学学报, 2000(4): 370—375.
- [3] 钱家欢, 殷宗泽. 土工原理与计算[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1996. 54—56.
- [4] CASPE M S. Surface settlement adjacent to braced open cut[J]. JSMFD, ASCE, 1996, 92(SM4): 51—59.

Calculation model for earth pressure during foundation pit excavation

JIANG Zhi-qiang, SUN Shu-lin, LI Lei

(College of Civil Engineering, Hohai Univ., Nanjing 210098, China)

Abstract: According to the general characteristics of the relationship between the earth pressure and displacement of soil, the relationship between the earth pressure on the support structure of foundation pits and displacement is expressed by a hyperbola, and a formula is derived for calculation of the earth pressure, in which the variation of soil displacement is considered. The formula can reflect the non-linear characteristics of the relationship, and the governing parameters of the formula can be obtained through laboratory tests.

Key words: earth pressure; displacement; relaxation stress; squeezing stress; hyperbolic model