

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2015.02.004

基坑支护桩非极限准主动土压力计算研究

李和志¹, 赵永清², 陈春鸣³

(1. 江西科技学院 土木工程学院, 江西 南昌 330098; 2. 湖南科技学院 土木工程与建设管理系, 湖南 永州 425199;
3. 东莞理工学院城市学院 城市与环境科学系, 广东 东莞 523419)

摘要: 目前基坑支护桩土压力计算多数是运用经典土压力理论或者规范经验法计算, 而这些方法大多是基于极限平衡状态推导出来的, 这与基坑工程非极限状态土体有明显差异。为此, 在他人已有研究成果的基础上, 运用水平层分析法并结合合理的假设, 推导出介于初始状态与极限状态间的非极限状态的准主动土压力计算公式, 从而改进了水平层分析法。经基坑工程实例分析表明, 由此得出的准主动土压力与工程实测土压力基本相符, 且较朗肯主动土压力法、水平分层分析法计算结果偏大, 但小于静止土压力法的值, 这符合非极限状态土压力规律; 同时也说明本文假设的合理性及准主动土压力计算公式的正确性。

关键词: 非极限状态; 基坑支护; 水平层分析法; 准主动土压力

中图分类号: TU443

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2015)02-0021-05

Calculation and Research on Non-Limit Quasi Active Earth Pressure of Pit Support Pile

Li Hezhi¹, Zhao Yongqing², Chen Chunming³

(1. School of Civil Engineering, Jiangxi University of Technology, Nanchang 330098, China; 2. School of Civil Engineering, Hunan University of Science and Engineering, Yongzhou Hunan 425199, China; 3. Department of City and Environment Science, City College of Dongguan University of Technology, Dongguan Guangdong 523419, China)

Abstract : At present the foundation pit supporting pile soil pressure calculation mostly applies the classical earth pressure theory or normative experience method, which deduced under the limit equilibrium state, and is significantly different from the foundation pit engineering under non-limit state of soil. Based on the previous research results, applies the method of level-layer analysis and combining with the reasonable assumption to deduce the calculation formula of quasi active earth pressure of non-limit state between initial state and limit state, and improves the method of level-layer analysis. Through the analysis of the foundation pit engineering examples, it shows that the obtained quasi active earth pressure value is basically consistent with the actual measured earth pressure, and the calculating result of the method of level-layer analysis relatively larger than the consequence of Rankine active earth pressure, but it is less than the static earth pressure value, which in line with the non-limit state law of earth pressure. It also illustrated reasonableness of the previous assumptions and correctness of quasi- active earth pressure formula.

Keywords : non-limit state; foundation pit support; level-layer analysis method; quasi active earth pressure

收稿日期: 2014-12-04

基金项目: 江西省科技计划基金资助项目(20123BBG70180), 湖南省教育厅科研基金资助项目(12K103), 江西科技学院自然科学基金资助项目(ZR14YB08)

作者简介: 李和志(1985-), 男, 湖南双峰人, 江西科技学院讲师, 硕士, 主要从事边坡工程及地基基础方面的教学与研究,
E-mail: lihezhi3301@qq.com

0 引言

随着基坑工程的大量出现, 基坑因支护失效而造成重大的施工事故时有发生。虽然事故发生的原因多种多样, 但在基坑支护设计时对支护桩承受的土压力的计算是最关键的原因。只要对支护桩承受的土压力有了清晰的认识且有更合理的计算方法, 才能更好地防止基坑事故的发生。目前土压力计算理论主要有: 库仑土压力理论、朗肯土压力理论、极限平衡理论、能量理论、凝聚力等效法则、水平层计算方法、空间土压力理论等^[1]。这些理论和方法大多数是基于极限平衡来推导土压力计算公式的, 这与基坑支护桩后土体实际上是处于非极限平衡状态相违背。基于此, 国内外许多学者对非极限状态土压力的计算进行了研究。例如: S. Bang^[2]指出, 处在初始状态与极限主动状态间的中间主动状态时的土压力计算, 需考虑支护结构的位移模式和大小。A. Kezdi^[3]提出, 挡土墙绕墙脚向外转动时, 接近墙脚位置的土体临近静止状态。M. F. Chang^[4]假定挡墙墙面与土体间摩擦角、滑动面间土的内摩擦角的发挥与该点的土体位移呈线性关系。H. Matsuzawa 等^[5]通过模型试验, 证实了挡土墙在不同位移模式下, 墙背土压力分布及合力作用点位置都受到一定的影响。徐日庆、龚慈、杨泰华、卢坤林、卢国胜、张永兴、王仕传等人^[6-13]对土的非极限状态土压力计算也进行了深入地研究, 且卢坤林在文献[10]中将这种非极限状态的土压力定义为准主动土压力。

本文在他人研究的基础上, 运用水平层分析法并结合合理的假设, 推导出介于初始状态与极限状态间的非极限状态的准主动土压力计算公式, 进而改进了水平层分析法的在工程实际中的应用, 并通过算例来验证假设的合理性及准主动土压力计算公式的正确性。

1 准主动土压力推导

1.1 基本假定

为便于非极限状态准主动土压力理论公式的推导, 作如下假定:

1) 假定基坑土体为黏性土, 土质均匀, 支护桩背后土体表面水平且无限延伸, 并布有均布荷载, 支护桩与土体接触面的摩擦角为 δ 且其值较小, 基坑支护结构挡土面竖直无倾斜。

2) 假定土体滑动体的破裂面为平面且与竖直面成 θ 角, 不考虑填土表面开裂。

3) 假定支挡结构绕支挡底部转动, 且基坑顶部

土体达到主动土压力状态。即可假设主动区土体由下至上逐渐由静止土压力变为主动土压力, 即可假设离基坑支护顶部 z 处的土压应力

$$p = \frac{z}{H} p_0 + \frac{H-z}{H} p_a \cos \delta,$$

式中: p_0 , p_a 分别为在主动区深度 z 处的静止和主动土应力, 且 $p_0 = k_0 \cdot \gamma \cdot z$, $k_0 = 0.95 - \sin \varphi$, φ 为土体内摩擦角, γ 为土体容重; $\delta = 0.33 \varphi$ ^[14]; H 为支护桩计算长度。

1.2 准主动土压力推导

准主动土压力推导简图如图1所示。 BD 为滑动面且与竖直线成 θ 角, ABD 为滑动土体。假定离填土表面以下深度 z 处的水平层顶部作用的正应力为 q 。

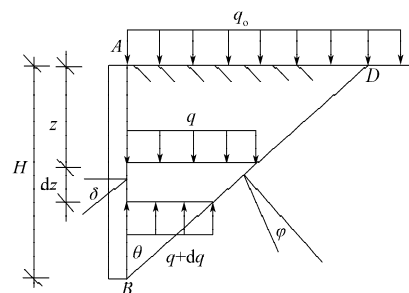


图1 准主动土压力推导简图

Fig. 1 Derivation diagram of quasi-active earth pressure

根据黏性土凝聚力等效法则^[1], 将土的凝聚力 c 化为内结构压力作用于滑动土体周围, 即在滑动土体 AB 面、 BD 面和 DA 面上各增加一个均匀分布, 且垂直于各面的额外内结构压力 $\frac{c}{\tan \varphi}$ 。为便于分析, 在 DA 面, 额外内结构压力不变, 依旧垂直水平面 DA ; 在 AB 面, 进一步将额外内结构压力转换为与此面垂直面成 δ 角的额外内结构压力 $\frac{c}{\tan \varphi \cos \delta}$; 在 BD 面, 进一步将额外内结构压力转换为与此面垂直面成 φ 角的额外内结构压力 $\frac{c}{\sin \varphi}$ 。从而该土体可由黏性土转化为无黏性土来进行分析和计算。

在滑动土体离表面深度 z 处取一个厚度为 dz 的微分水平土层, 设顶部宽度为 b_1 , 底部宽度为 b_2 , 右边侧面斜边的水平长度为 Δ_1 。由图1中的几何关系可知:

$$b_1 = (H-z) \tan \theta, \quad (1)$$

$$b_2 = (H-z-dz) \tan \theta, \quad (2)$$

$$\Delta_1 = \tan \theta dz. \quad (3)$$

设该微分土层的自重 dG , 并忽略二阶微分, 可得

$$dG = \gamma \frac{b_1 + b_2}{2} dz = \gamma (H-z) \tan \theta dz. \quad (4)$$

在深度为 z 处的微分水平土层顶面正应力为 q ,

在该土层底面正应力为 $q+dq$ 。在 AB 面作用反力强度为 $p_a + \frac{c}{\tan \varphi \cos \delta}$ ，与 AB 面的垂直面成 δ 角且在法线下侧。在 BD 面作用反力强度为 $r + \frac{c}{\sin \varphi}$ ，与 BD 面的垂直面成 φ 且在法线下侧，其中 r 为滑动面以下土体对滑动微分水平土层的反力强度。

微分水平土层在上述力平衡作用下，根据文献[1]可推导出基坑支护桩处于极限状态时的主动土应力计算式

$$p_o = \frac{\lambda \gamma}{A+1} \left[\frac{H^{\eta+1}}{(H-z)^\eta} - (H-z) \right] + \frac{c}{\tan \varphi} \left[\frac{\lambda H^\eta}{(H-z)^\eta} - \frac{1}{\cos \delta} \right] + \frac{\lambda q_o H^\eta}{(H-z)^\eta}, \quad (5)$$

式中： $\lambda = \frac{\tan \theta}{\cos \delta \tan(\theta + \varphi) - \sin \delta}$ ；

$$\eta = \frac{2 \sin \delta}{\sin \delta - \cos \delta \tan(\theta + \varphi)}。$$

考虑基坑变形受到限制，使土体实际上处于非极限状态，结合假定3)可知，

$$p = \frac{z}{H} p_o + \frac{H-z}{H} p_a \cos \delta = \frac{z}{H} (0.95 - \sin \varphi) \gamma z + \frac{\lambda \gamma (H-z) \cos \delta}{(\eta+1)H} \left[\frac{H^{\eta+1}}{(H-z)^\eta} - (H-z) \right] + \frac{c(H-z) \cos \delta}{H \tan \varphi} \left[\frac{\lambda H^\eta}{(H-z)^\eta} - \frac{1}{\cos \delta} \right] + \frac{\lambda q_o H^{\eta-1} \cos \delta}{(H-z)^{\eta-1}}。 \quad (6)$$

作用于支护桩上的总准主动土压力 P ，可通过对式(6)积分求得

$$P = \frac{\gamma H^2}{3} (0.95 - \sin \varphi) + \frac{\lambda \gamma H^2 \cos \delta}{3(2-\eta)} + \frac{c \lambda H \cos \delta}{\tan \varphi (2-\eta)} - \frac{cH}{2 \tan \varphi} + \frac{\lambda q_o H \cos \delta}{2-\eta}。 \quad (7)$$

令 $K = \frac{2\lambda \cos \delta}{3(2-\eta)} = \frac{\tan \theta \cot(\theta + \varphi)}{3}$ ，则 P 可进一步化为

$$P = \frac{\gamma H^2}{3} (0.95 - \sin \varphi) + \frac{\gamma H^2 K}{2} + \frac{3cHK}{2 \tan \varphi} - \frac{cH}{2 \tan \varphi} + \frac{3q_o HK}{2}。 \quad (8)$$

将式(8)对 θ 求导，并令导数等于0，可求出 θ 、 p 、 P 及作用位置。

$$\frac{\partial P}{\partial \theta} = \left(\frac{\gamma H^2}{2} + \frac{3cH}{2 \tan \varphi} + \frac{3q_o H}{2} \right) \cdot \frac{\sec^2 \theta \cot(\theta + \varphi) - \csc^2(\theta + \varphi) \tan \theta}{3} = 0。 \quad (9)$$

求解式(9)可得

$$\theta = \frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2}。 \quad (10)$$

将式(10)代入式(6)，可得

$$p = \frac{z}{H} (0.95 - \sin \varphi) \gamma z + \frac{\lambda \gamma (H-z) \cos \delta}{(\eta+1)H} \left[H \left(\frac{H-z}{H} \right)^{-\eta} - (H-z) \right] + \frac{c(H-z) \cos \delta}{H \tan \varphi} \left[\lambda \left(\frac{H-z}{H} \right)^{-\eta} - \frac{1}{\cos \delta} \right] + \lambda q_o \cos \delta \left(\frac{H-z}{H} \right)^{1-\eta}。 \quad (11)$$

将式(10)代入式(8)，可求得

$$P = \frac{\gamma H^2}{3} (0.95 - \sin \varphi) + \frac{\gamma H^2 K}{2} + \frac{3cHK}{2 \tan \varphi} - \frac{cH}{2 \tan \varphi} + \frac{3q_o HK}{2}。 \quad (12)$$

设离支护桩底部 x_o 处为 P 作用于支护桩的作用点位置，则有

$$P_{x_o} = \int_0^H \left(\frac{z(H-z)}{H} p_o + \frac{(H-z)^2}{H} p_a \cos \delta \right) dz = \frac{\gamma H^3}{12} (0.95 - \sin \varphi) + \frac{\gamma H^3 M}{4} + \frac{cH^2 M}{\tan \varphi} - \frac{cH^2}{3 \tan \varphi} + q_o H^2 M, \quad (13)$$

$$\text{式中 } M = \frac{\tan \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} \right)}{3 \tan \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right) - \tan \delta}。$$

所以 P 作用于支档结构的作用点位置离支档底部距离

$$x_o = \frac{\frac{\gamma H^3}{12} (0.95 - \sin \varphi) + \frac{\gamma H^3 M}{4}}{\frac{\gamma H^2}{3} (0.95 - \sin \varphi) + \frac{\gamma H^2 K}{2}} \rightarrow \frac{\frac{cH^2 M}{\tan \varphi} - \frac{cH^2}{3 \tan \varphi} + q_o H^2 M}{\frac{3cHK}{2 \tan \varphi} - \frac{cH}{2 \tan \varphi} + \frac{3q_o HK}{2}}。 \quad (14)$$

2 工程算例

采用文献[15]中土压力的计算作为算例，各岩土层的主要物理力学指标见表1。

表1 土层的主要物理力学指标

Table 1 The main physical and mechanical index of soil

| 土层 编号 | 土层 名称 | 粘聚力 c/kPa | 内摩擦角 φ/(°) | 重度γ/ (kN·m ⁻³) | 南侧 层厚/m | 北侧 层厚/m |
|----------|----------|--------------|---------------|-------------------------------|------------|------------|
| 1 | 杂填土 | 5 | 5 | 18.0 | 5.5 | 0.5 |
| 2 | 粉质黏土 | 30 | 13 | 18.0 | 2.5 | 4.5 |
| 3 | 黏土 | 38 | 14 | 18.3 | 0 | 1.5 |
| 4 | 砂质黏性土 | 35 | 13 | 18.5 | 7.5 | 8.5 |
| 5 | 强风化混合岩 | 40 | 35 | 18.5 | 6.5 | 6.0 |

为分析方便，首先将各土层的粘聚力、内摩擦角、重度分别按土层厚度进行加权平均，可分别求出南侧和北侧的粘聚力、内摩擦角、重度的加权平均值。考虑到中风化混合岩的变形较少及施工扰动影响，南面支护桩长H在计算时取至强风化混合岩底面，北面支护桩长H在计算时取至基坑底以下3m位置即可。对基坑南面有：

$$c_{南} = \frac{\sum c_i \cdot h_i}{\sum h_i} = 28.409 \text{ kPa},$$

$$\varphi_{南} = \frac{\sum \varphi_i \cdot h_i}{\sum h_i} = 17.5^\circ,$$

$$\gamma_{南} = \frac{\sum \gamma_i \cdot h_i}{\sum h_i} = 18.318 \text{ kN/m}^3,$$

$$\delta_{南} = 0.33\varphi_{南} = 5.775^\circ$$

$$\theta_{南} = 36.25^\circ,$$

$$H_{南} = 22 \text{ m}.$$

同理，对基坑北面有：

$$c_{北} = 34.857 \text{ kPa},$$

$$\varphi_{北} = 19.167^\circ,$$

$$\gamma_{北} = 18.367 \text{ kN/m}^3,$$

$$\delta_{北} = 6.325^\circ,$$

$$\theta_{北} = 35.417^\circ,$$

$$H_{北} = 21 \text{ m}.$$

将以上参数代入式(11)，可算得基坑南北两侧的非极限准主动土压力强度分布规律。在计算北侧-15m的准主动土压力时，因土层摩擦角与加权平均值相差甚远，故摩擦角仍取原土层摩擦角。运用本文所推导的计算土压力的方法(改进水平分层分析法)与水平分层分析法、静止土压力法、朗肯主动土压力法计算出的基坑南、北两面不同深度的土压力值与现场测试结果见表2~3。

从表2和表3可知，在基坑南、北面，用改进水平分层分析法计算所得的土压力值，比水平分层分析法及朗肯主动土压力法计算所得的值大，但比静止土压力法计算所得的值小，这从理论上符合由静止土压力到极限主动土压力状态转变的规律。用改进水平分层分析法计算得到的土压力值与现场测

试的结果基本相符。不足的是在支护桩底部，用改进水平分层分析法得到的土压力值有所偏高。

表2 南面土压力值

Table 2 The south soil pressure value

| 深度/ m | 土压力/kPa | | | | |
|----------|---------------|-------------|------------|--------------|------------|
| | 改进水平 分层分析法 | 水平分层 分析法 | 静止 土压力法 | 朗肯主动 土压力法 | 现场 测试结果 |
| 4.5 | 16.757 | 6.475 | 53.523 | 2.657 | 13.9~39.2 |
| 7.5 | 54.028 | 35.031 | 89.204 | 32.202 | 31.3~53.4 |
| 13.5 | 131.929 | 86.397 | 160.568 | 91.292 | 50.0~113.1 |

表3 北面土压力值

Table 3 The north soil pressure value

| 深度/ m | 土压力/kPa | | | | |
|----------|---------------|-------------|------------|--------------|-------------|
| | 改进水平 分层分析法 | 水平分层 分析法 | 静止 土压力法 | 朗肯主动 土压力法 | 现场测试 结果 |
| 3.0 | -9.530 | -17.229 | 34.255 | -21.712 | 10.7~61.8 |
| 6.0 | 26.984 | 10.049 | 68.509 | 6.150 | 5.4~40.5 |
| 9.0 | 64.546 | 35.588 | 102.764 | 34.012 | 33.1~150.2 |
| 12.0 | 103.505 | 58.486 | 137.019 | 61.875 | 31.9~177.0 |
| 15.0 | 144.426 | 76.820 | 171.274 | 89.737 | 123.6~158.8 |
| 18.0 | 111.579 | 84.896 | 205.528 | 117.599 | 37.5~114.1 |

3 结语

本文给出了计算非极限状态时土压力的一种新方法——改进水平分层分析法。通过工程实例，将采用本文方法所得结果与其它方法所得结果以及实测结果进行了比较，从而验证了本文方法的合理性和有效性。但用本文方法计算支护桩底部的土压力比实测值偏高，故改进水平分层分析法还有待进一步优化。

参考文献：

- [1] 顾慰慈. 挡土墙土压力计算手册[M]. 北京：中国建材工业出版社，2005：18-51.
Gu Weici. Retaining Wall Soil Pressure Calculation Manual [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2005: 18-51.
- [2] Bang S. Active Earth Pressure Behind Retaining Walls[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1985, 111(3): 407-412
- [3] Kezdi A. Earth Pressure on Retaining Wall Tilting About the Toe[C]//Conference on Earth Pressure Problems. Brussels: [s. n.], 1958: 116-132.
- [4] Chang M F. Lateral Earth Pressures Behind Rotating Walls [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1997, 34(4): 498-509.
- [5] Matsuzawa H, Hazarika H. Analyses of Active Earth Pressure Against Rigid Retaining Walls Subjected to Different Models of Movement[J]. Soils and Foundations, 1996, 36 (3) : 51-65.

- [6] 徐日庆, 廖 斌, 吴 渐, 等. 黏性土的非极限主动土压力计算方法研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(1): 148-154.
Xu Riqing, Liao Bin, Wu Jian, et al. Computational Method for Active Earth Pressure of Cohesive Soil Under Nonlimit State[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(1): 148-154.
- [7] 徐日庆, 陈页开, 杨仲轩, 等. 刚性挡墙被动土压力模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(5): 569-575.
Xu Riqing, Chen Yekai, Yang Zhongxuan, et al. Experimental Research on the Passive Earth Pressure Acting on a Rigid Wall[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 24(5): 569-575.
- [8] 龚 慈, 魏 纲, 徐日庆. RT模式下刚性挡墙土压力计算方法研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(9): 1588-1592.
Gong Ci, Wei Gang, Xu Riqing. Earth Pressure Against Rigid Retaining Wall Rotating About Top[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(9): 1588-1592.
- [9] 杨泰华, 贺怀建. 考虑位移效应的土压力计算理论[J]. 岩土力学, 2010, 31(11): 3635-3639, 3650.
Yang Taihua, He Huaijian. Earth Pressure Calculation Theory Considering Displacement Effects[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(11): 3635-3639, 3650.
- [10] 卢坤林, 杨 扬. 非极限主动土压力计算方法初探[J]. 岩土力学, 2010, 31(2): 615-619.
Lu Kunlin, Yang Yang. Preliminary Study of Active Earth Pressure Under Nonlimit State[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(2): 615-619.
- [11] 卢国胜. 考虑位移的土压力计算方法[J]. 岩土力学, 2004, 25(4): 586-589.
Lu Guosheng. A Calculation Method of Earth Pressure Considering Displacement[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(4): 586-589.
- [12] 张永兴, 陈 林. 挡土墙非极限状态主动土压力分布[J]. 土木工程学报, 2011, 44(4): 112-119.
Zhang Yongxing, Chen Lin. Active Earth Pressure on Retaining Walls in Non-Limit State[J]. China Civil Engineering Journal, 2011, 44(4): 112-119.
- [13] 王仕传, 凌建明. 刚性挡土墙非线性主动土压力分析[J]. 地下空间与工程学报, 2006, 2(2): 242-244, 275.
Wang Shichuan, Ling Jianming. Nonlinear Analysis of Active Earth Pressure on a Rigid Retaining Wall[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2006, 2(2): 242-244, 275.
- [14] 高大钊. 土力学与基础工程[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1998: 127-128, 137.
Gao Dazhao. Soil Mechanics and Foundation Engineering [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1998: 127-128, 137.
- [15] 唐孟雄, 陈如桂, 陈 伟. 深基坑工程变形控制[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006: 69-71.
Tang Mengxiong, Chen Rugui, Chen Wei. Deformation Control of Deep Foundation Pit Engineering[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2006: 69-71.

(责任编辑: 邓光辉)