

# 考虑围护结构位移的非对称基坑土压力分析

喻 军<sup>1,2,3</sup>, 鲁 嘉<sup>2</sup>, 龚晓南<sup>3</sup>

(1. 浙江工业大学建工学院, 浙江 杭州 310032; 2. 浙江省建设投资集团有限公司, 浙江 杭州 310012; 3. 浙江大学建工学院, 浙江 杭州 310029)

**摘 要:** 分析了影响土压力值大小的因素, 提出了非对称基坑在结构位移的影响下土压力的计算公式, 用此公式计算某基坑的土压力, 与现场监测数据对比分析, 发现非对称基坑的土压力大小是基坑两侧土体位移的综合表现, 位移近似等于支撑的变形, 土压力略小于支撑的内力; 在降水时, 土压力值减小, 有利于基坑的稳定; 在降雨条件下, 则相反。研究结果可为其他基坑安全施工设计提供借鉴。

**关键词:** 位移; 非对称基坑; 土压力分布; 监测

**中图分类号:** TU476

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-4548(2012)S0-0024-04

**作者简介:** 喻 军(1978-), 男, 湖南邵阳人, 博士后, 讲师, 主要从事基坑及地下工程的研究工作。E-mail: yujunsunny@163.com。

## Earth pressure on supporting structures of asymmetric excavations considering their displacement

YU Jun<sup>1,2,3</sup>, LU Jia<sup>2</sup>, GONG Xiao-nan<sup>3</sup>

(1. College of Civil Engineering And Architecture, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310032, China; 2. Zhejiang Construction Investment Group Co., Ltd., Hangzhou 310012, China; 3. College of Civil Engineering And Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310029, China)

**Abstract:** The reason of earth pressure alteration is analyzed, and the formula for calculating the earth pressure considering the displacement of structures of asymmetric excavations are put forward. The earth pressure is calculated, compared and analyzed according to the monitoring data. They are almost equal. At the same time, the earth pressure of asymmetric excavations is the comprehensive result of soil displacement around them. The soil displacement is almost equal to the deformation of structure and earth pressure is less than the internal force of supporting structures. A formula for earth pressure considering water pressure and asymmetric displacement is concluded. It is concluded that the earth pressure for dewatering gets less and it benefits to the stability of excavations, and vice versa during raining. The earth pressure is nearly equal to the force of lining. It may be useful for the design of similar projects.

**Key words:** displacement; asymmetric excavation; distribution of earth pressure; monitoring

## 0 引 言

为了满足不断增加的城市人口的需求, 城市建筑和交通不得不向空中和地下发展, 进而出现了高层建筑、高架和地下商场、地铁等。此时, 深大基坑如雨后天春笋般出现在城市各地, 并且向着超深超大的方向发展, 作用在围护结构上的土压力变得更为复杂, 难以通过经典土压力理论公式计算。从某基坑的现场监测的结果来看, 比理论计算值要小, 为何出现了事故, 这说明人们对原状土基坑中土与结构的相互作用及水土作用机理尚未认识清楚, 所以有必要进一步认识水土压力作用及其与结构之间的作用机理, 提出合理的土压力计算图式。

浙江沿海软土地区较多, 其工程地质和水文地质

条件较差, 土体具有高含水率、高灵敏度、高压缩性、低密度、低渗透性和流塑等特点, 更增加了基坑工程的难度, 再者, 土压力值随围护结构变形而调整, 土压力精确计算也更为困难, 开展基坑工程变形与土压力的关系研究具有重要意义。

据资料, 土压力大小与土体位移、围护结构的摩阻力等有关, 如徐日庆、梅国雄等<sup>[1-6]</sup>拟合了土压力与土体位移的关系式。在监测中发现, 当施工或地质条件不对称, 支撑有向一侧位移的趋势, 同时, 作用在围护结构上的土压力也随之调整。研究此类基坑的土

**基金项目:** 浙江省科技厅项目 (2012C21074); 浙江工业大学基金项目 (2011XY024); 浙江省住建厅项目; 浙江工业大学科研启动项目  
**收稿日期:** 2012-08-21

压力分布为防止基坑失稳意义重大。

## 1 基坑围护结构上土压力的影响因素

(1) 在基坑开挖过程中, 土体的扰动使其结构性破坏、强度降低, 从而使土体自稳能力降低, 侧向土压力增加。此外, 开挖的卸荷作用使围压减小, 强度指标降低<sup>[2]</sup>。

(2) 基坑开挖后, 土体残余应力的存在, 开挖引起的“负附加应力”远大于基坑底部的自重应力, 开挖引起的超固结土体减少了主动土压力, 增加了被动土压力<sup>[10]</sup>。

(3) 基坑开挖引起超负静孔压力, 减小了围护结构上的土压力, 以及墙体后的毛细饱和区、渗流力都有利于结构稳定<sup>[5-6]</sup>。

(4) 基坑开挖的空间效应使结构变形减小, 土与结构的摩阻力, 土层的约束作用使土压力减小<sup>[11]</sup>。

(5) 土体内部结构调整, 产生变形, 改变了土压力的大小, 从而影响土压力值<sup>[3-4]</sup>。

## 2 围护结构上的土压力分析

目前, 设计深基坑支护结构时, 土压力的计算仍然采用库伦土压力公式和朗肯土压力公式, 但计算结果与实际监测的土压力相差较大<sup>[7-8]</sup>。

### 2.1 经典土压力公式

传统朗肯土压力计算公式中, 土体表面以下  $z$  处的主动土压力与被动土压力分别表示为:

$$P_{az} = \gamma z K_a - 2c\sqrt{K_a}, \quad (1)$$

$$P_{pz} = \gamma z K_p + 2c\sqrt{K_p}。 \quad (2)$$

式中  $K_a$ ,  $K_p$  分别表示主动土压力系数和被动土压力系数;  $\gamma$  表示土的重度;  $c$  为黏聚力。

### 2.2 考虑地下水渗流时土压力公式

存在地下水渗流时, 水流对土颗粒以拖曳, 形成渗流力, 土颗粒给水流以反作用力, 消耗了能量, 造成水头损失。渗透力与水力梯度成正比, 并且与渗流方向一致, 即

$$j = \gamma_w i, \quad (3)$$

式中,  $i = h/(h + 2h_d)$ ,  $h$  为基坑深度,  $h_d$  为围护结构插入深度。

主动侧渗透力向下, 有效垂直应力增加, 为  $(\gamma + j)z$ , 而被动侧渗透力向上, 有效垂直应力减小, 为  $(\gamma - j)z$ , 所以主动土压力与被动土压力分别如下:

$$P_{az} = (\gamma + \gamma_w h/(h + 2h_d))z K_a - 2c\sqrt{K_a}, \quad (4)$$

$$P_{pz} = (\gamma - \gamma_w h/(h + 2h_d))z K_p + 2c\sqrt{K_p}。 \quad (5)$$

在降水过程中, 主动土压力增加, 被动土压力减小, 回灌过程中, 则相反。

### 2.3 考虑黏性土与砂土互层的约束作用

不同土层间的摩擦力和拱效应, 减小了土体的变形, 从而减小了土压力。施工扰动使土体的强度减小, 从而使主动土压力增加, 被动土压力减小, 所以尽量少扰动土体, 保持土体自稳。

### 2.4 考虑支撑结构水平位移的影响

不考虑支撑结构被压缩的长度, 仅仅考虑各自的水平位移对土压力的影响, 若位移为  $\Delta l$ , 它与基坑两侧土性、施工顺序有关, 则一侧为正, 一侧为负, 对徐日庆<sup>[3]</sup>位移与土压力关系公式修正如下:

$$\sigma_a = P_{az} + \sin\left(\frac{\pi}{2} \frac{\delta + \Delta l}{\delta_{acr}}\right)(\sigma_{acr} - P_{az}), \quad (6)$$

$$\sigma_p = P_{pz} + \sin\left(\frac{\pi}{2} \frac{\delta - \Delta l}{\delta_{pcr}}\right)(\sigma_{pcr} - P_{pz})。 \quad (7)$$

式中,  $P_{az}$ ,  $P_{pz}$  与式 (4), (5) 中相同。

## 3 实例计算与现场监测验证

### 3.1 工程概况

宁波宁穿路地铁车站位于宁波市东部新城, 距宁波市中心约 10 km。场地北侧为建设中的宁波市行政综合楼, 南侧为规划的公园, 东侧、西侧有待建的工程。基坑分为两层: 第一层主基坑连接车库, 长 253.1 m, 宽 101.6 m, 高为 8.85 m; 第二层为南侧的一个小基坑, 为地铁车站, 长 253.1 m, 宽 20.7 m, 深 11.0 m, 为坑中坑。

车库基坑主要采用钻孔灌注桩+高压旋喷桩止水帷幕作为围护结构, 设 1 道临时钢筋混凝土支撑。车库北侧钻孔灌注桩桩长 17.9 m, 桩径 900 mm, 桩距 1100 mm。坑中坑采用高压旋喷桩围护。同时在车库南侧 250 m 范围的围护桩间设置 3 排土层锚杆加固土体。

车站基坑采用地下连续墙作为围护结构, 设 3 道临时钢支撑加一道换撑。标准段地下连续墙高约为 19.0 m, 墙厚 600 mm; 端头井地下连续墙高约 25.6 m, 墙厚 800 mm。在车库基坑南侧围护结构与车站基坑南侧围护结构之间土体、车站转角处土体注浆加固。由于盾构机在车站两端头处要掉头, 所以在端头井两端土体进行注浆加固。监测点布置, 如图 1 所示。

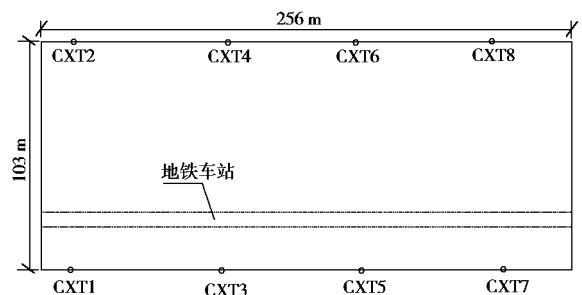


图 1 非对称基坑监测点布置示意图

Fig. 1 Distribution of monitoring points of asymmetric excavation



表 1 土性参数统计  
Table 1 Statistic values of parameters of soils

序号	土层名称	厚度/m	重度 $\gamma$ /( $\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$ )	黏聚力 $c/\text{kPa}$	内摩擦角 $\varphi/(^{\circ})$	含水率 $w/\%$
(1)1层	填土 (mlQ)	0.3~1.8				
(1)2层	黏土 (al-IQ43)	0.7~1.6	19.28	20.9	18.0	29.9
(1)3层	淤泥质黏土 (mQ34)	2.3~4.3	19.57	16.3	25.3	27.3
(2)1层	淤泥 (mQ24)	4.6~6.9	19.33	14.5	25.5	25.3
(2)2层	淤泥质黏土 (mQ24)	3.6~6.3	19.59	12.1	29.1	26.2
(3)1层	粉砂 (al-mQ14)	2.0~2.3	17.97	20.0	7.6	40.4
(3)1a层	含黏性土粉砂 (al-mQ14)	1.6~5.1	19.37	22.2	10.8	30.8
(4)1层	含砂粉质黏土 (mQ14)	3.3~7.8	19.39	27.3	11.0	29.9
(4)2层	粉质黏土 (mQ14)	2.6~12.90	18.65	25.5	11.5	33.9
(4)2a层	含黏性土粉砂 (al-mQ14)	1.0~3.9	20.44	27.4	10.3	23.5
(4)2b层	黏土混贝壳 (mQ14)	2.9	20.08	35.1	11.5	25.2
(4)3层	黏土 (mQ14)	1.4~5.5	17.24	14.9	10.3	24.2
(5)1层	粉质黏土 (al-IQ23)	1.9~5.9	19.15	57.6	15.6	27.2
(5)2层	粉质黏土夹粉土 (al-IQ23)	1.2~6.6	18.65	25.5	11.5	33.9

3.2 地质概况

根据土层的沉积年代、沉积环境、岩性特征及物理力学性质，同时结合野外钻探，将勘探深度范围内的地基土划分为9个工程地质层，并细分为25个工程地质亚层，各地基土层的工程特性按地层层序由上至下列于表1。

根据公式（6）、（7）计算得到基坑两侧不同的土压力，如图 2、3。从土压力变化趋势来看，靠近车站一侧的土压力明显大于车库一侧的围护结构上的土压力，并且两者土压力随基坑深度的增长趋势一致，与现场监测的数据相似。说明非对称基坑的土压力分布存在差异，会导致支撑的位移，从而调整内支撑的内力。

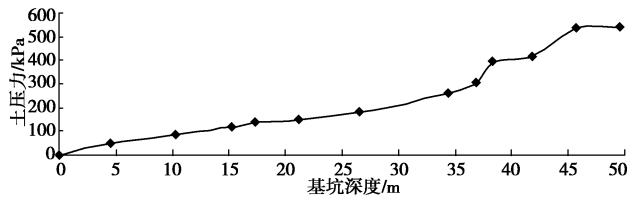


图 2 计算得到基坑深度和土压力之间的关系（车站一侧）  
Fig. 2 Relation between depth of excavation and earth pressure according to theoretical calculation (railway station side)

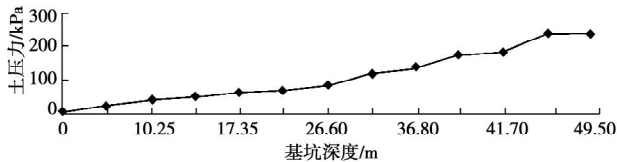


图 3 计算得到基坑深度和土压力之间的关系（车库一侧）  
Fig. 3 Relation between depth of excavation and earth pressure according to theoretical calculation (garage side)

4 监测数据分析

监测该基坑沿深度方向土压力的分布规律如图

4。从以上计算和监测可知，修正后的土压力公式计算值与实测值比较吻合，略大于经典土压力值，但更接近实际。当基坑深度在 7 m 以下时，土压力值增加比较快；当基坑深度大于 7 m 小于 17 m 时，土压力值增加比较平缓；大于 17 m 以后，土压力值增加速率变大。基坑的土压力分析是两侧土体位移的综合表现，位移近似等于支撑的变形，土压力略小于支撑的内力。

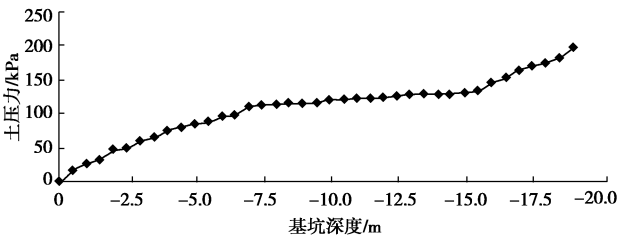


图 4 现场监测得到基坑深度和土压力之间的关系  
Fig. 4 Relation between depth of excavation and earth pressure according to monitoring data

5 结 论

- （1）准确计算土压力是正确设计基坑围护结构的前提条件，依据朗肯和库伦土压力计算公式，不是偏小就是偏大，常常导致工程事故或造成浪费。
- （2）考虑施工过程中，渗流力及土体与结构的摩阻力使基坑土压力减小，提出新的计算公式，并与实测数据进行验证，说明修正方法的可行性和合理性。
- （3）土压力的计算应针对不同的围护结构变形和与土的摩阻力，采用不同的计算公式，所以对于土压力理论有待进一步完善。
- （4）由于基坑的非对称性，导致基坑围护结构上的土压力不一致，从而内支撑上内力发生调整，以适

应外力的变化, 在施工时应引起重视, 以免事故的发生。

### 参考文献:

- [1] 宋明健, 汤连生, 胡 辉. 考虑坑壁位移和土压力方向的直撑力学特性[J]. 岩土力学, 2009, **30**(7): 2031 - 2036. (SONG Ming-jian, TANG Lian-sheng, HU Hui. Mechanical characteristics of straight brace considering displacement of foundation pit and direction of earth pressure[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, **30**(7): 2031 - 2036. (in Chinese))
- [2] 杨光华. 深基坑支护结构的实用计算方法及其应用[M]. 北京: 地质出版社, 2004. (YANG Guang-hua. Applied calculation method and application of support structure of deep foundation pits[M]. Beijing: Geology Press, 2004. (in Chinese))
- [3] 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(工学版), 2000, **34**(4): 370 - 375. (XU Ri-qing. Methods of earth pressure calculation for excavation[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2000, **34**(4): 370 - 375. (in Chinese))
- [4] 梅国雄, 宰金珉. 考虑变形的朗肯土压力模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, **20**(6): 851 - 853. (MEI Guo-xiong, ZAI Jin-min. Rankine earth pressure model considering deformation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, **20**(6): 851 - 853. (in Chinese))
- [5] 李 蓓, 赵锡宏. 一种考虑挡土墙变形的深基坑非线性土压力方法[J]. 岩土力学, 2004, **25**(增刊 2): 453 - 458. (LI Bei, ZHAO Xi-hong. A nonlinear earth pressure method for deep excavation considering deformation of retaining wall[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, **25**(S2): 453 - 458. (in Chinese))
- [6] 邓子胜, 邹银生, 王贻荪. 考虑位移非线性影响的深基坑土压力计算模型研究[J]. 工程力学, 2004, **21**(1): 107 - 111. (DENG Zi-sheng, ZOU Yin-sheng, WANG Yi-sun. Calculation of the earth pressure considering nonlinear displacement influence on deep excavation[J]. Engineering Mechanics, 2004, **21**(1): 107 - 111. (in Chinese))
- [7] 杨建民, 郑 刚, 焦 莹. 天津站抽水试验数值反演分析[J]. 土木工程学报, 2010, **43**(9): 125 - 130. (YANG Jian-min, ZHENG Gang, JIAO Ying. Numerical back analysis of pumping tests at Tianjin Railway Station[J]. China Civil Engineering Journal, 2010, **43**(9): 125 - 130. (in Chinese))
- [8] 武朝军, 陈锦剑, 叶冠林. 苏州地铁车站基坑变形特性分析[J]. 岩土工程学报, 2010, **32**(增刊 1): 458 - 462. (WU Chao-jun, CHEN Jin-jian, YE Guan-lin. Deformation characteristics of foundation pits of subway stations in Suzhou[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, **32**(S1): 458 - 462. (in Chinese))
- [9] 李卫超, 王 伟, 王瑞祥. 上海基坑开挖引起地面沉降估算经验系数探讨[J]. 岩土工程学报, 2010, **32**(增刊 2): 73 - 76. (LI Wei-chao, WANG Wei, WANG Rui-xiang. Empirical coefficient for estimation of ground settlement caused by excavation in Shanghai[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, **32**(S2): 73 - 76. (in Chinese))
- [10] 李 琳, 杨 敏, 熊巨华. 软土地区深基坑变形特性分析[J]. 土木工程学报, 2007, **40**(4): 66 - 72. (LI Lin, YANG Min, XIONG Ju-hua. Analysis of the deformation characteristics of deep excavations in soft clay[J]. China Civil Engineering Journal, 2007, **40**(4): 66 - 72. (in Chinese))
- [11] 徐中华, 王建华, 王卫东. 上海地区深基坑工程中地下连续墙的变形性状[J]. 土木工程学报, 2008, **41**(8): 81 - 86. (XU Zhong-hua, WANG Jian-hua, WANG Wei-dong. Deformation behavior of diaphragm walls in deep excavations in Shanghai[J]. China Civil Engineering Journal, 2008, **41**(8): 81 - 86. (in Chinese))

(本文责编 明经平)