

支护结构平移时的坑中坑被动区土拱效应分析*

胡 辉^{1,2}, 汤连生^{1,3}, 林兴立², 桑海涛¹

(1. 中山大学地球科学系//工学院, 广东 广州 510275;

2. 暨南大学重大工程灾害与控制教育部重点实验室, 广东 广州 510632;

3. 广东省地质过程与矿产资源探查重点实验室, 广东 广州 510275)

摘 要: 坑中坑式基坑由于相关设计规范对一些关键参数的确定缺乏明确规定, 有时因为对内坑开挖引起外坑支护结构土压力的变化估计不足而引发一些工程事故; 现有研究成果在坑中坑工程的被动区土压力分析中, 没有考虑岩土工程中广泛存在的土拱效应, 土压力分析不准确。通过合理的假定, 对内坑支撑刚度较大且距离外坑支护结构较近的情况下, 建立了无黏性土被动土压力力学模型, 分析得到了坑间土体在极限应力条件下基于土拱效应的水平土压力系数和主应力旋转角; 利用水平分层分析法求解得到了考虑土拱效应的被动土压力分布、合力大小、合力作用点位置等表达式。通过算例与经典土压力理论分析成果比较表明, 研究成果能更好地反映实际土压力分布。

关键词: 坑中坑; 被动土压力; 土拱效应

中图分类号: TU753.3 文献标志码: A 文章编号: 0529-6579(2014)01-0135-06

Analysis of Soil Arching Effects in Pit-in-pit Passive Zone as Supporting Structure Parallel Movement

HU Hui^{1,2}, TANG Liansheng^{1,3}, LIN Xingli², SANG Haitao¹

(1. Department of Earth Sciences//School of Engineering, SunYat-sen University, Guangzhou 510275, China;

2. MOE Key Laboratory of Disaster Forecast and Control in Engineering, Jinan University, Guangzhou 510632, China;

3. Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources Exploration of Guangdong, Guangzhou 510275, China)

Abstract: Due to the lack of a clear definition for some key parameters in engineering design specifications, the wrong estimation of earth pressure produced by the inner pit excavation often results in accidents. The existing researches of earth pressure in the passive zone of pit-in-pit have not considered the soil arching effects, which widely exist in geotechnical engineering. As a result, an accurate analysis on passive earth pressure is impossible. In this paper, an earth pressure mechanical model of cohesionless soil is established by presuming the inner pit support structure with large stiffness and very close to the outer pit support structure. Coefficient of earth pressures and the large principal stress rotation angle are obtained by analysing the horizontal earth pressure between two pit supporting structures at a limit state based on soil arching effects, and then the theoretical formulae and the force point are obtained. The case

* 收稿日期: 2013-11-01

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40872205); 全国高等学校博士学科专项科研基金资助项目(20120171110031); 广东省自然科学基金资助项目(07003738, S2012040007331); 广东省科技计划(2008B030303009)资助项目

作者简介: 胡辉(1968年生), 男; 研究方向: 地下工程与软土地基加固; 通讯作者: 汤连生; E-mail: eestls@mail.sysu.edu.cn

study shows that this method can better reflect the actual situation by analysing horizontal differential elements comparing to the classical earth pressure theory.

Key words: pit-in-pit; passive earth pressure; soil arching effects

坑中坑是近年高层建筑、城市轨道交通、城市地下综合体工程中经常遇到的一种基坑形式,是指在大基坑内局部进行二次或者多次开挖,造成基坑坑底出现深度差异的现象。由于现行的建筑基坑支护技术规程中没有针对坑中坑外坑支护结构设计中如何确定支护深度等具体条款,有时设计工作对内坑开挖对外坑支护结构的影响程度估计不足而出现较多的工程事故^[1-5]。一般基坑支护工程设计中,较多地仍沿用经典土压力理论进行土压力分析,而众多学者的研究证明经典土压力理论得出的计算值与实测值存在较大出入;文献 [6-8] 对存在内坑情况下即有限土体的土压力计算方法进行了探究,但没有考虑土与支护结构的摩擦,也无法考虑土压力的分布。

土拱效应广泛存在于岩土工程中。有关挡土墙后土压力的研究成果证明考虑土拱效应的土压力更加符合实际情况^[9-15],土压力的分布与挡土结构的位移模式有关^[16-18]。但由于挡土墙后的土体是连续的,未涉及有限土体问题。本文基于土拱效应分析思路,对内坑支撑刚度较大、外坑支护结构平移条件下,利用水平分层分析法^[9,11-15]求解出了考虑土拱效应的坑间区被动土压力分布、合力大小、合力作用点位置等。

1 内外坑间区土拱效应分析

1.1 土拱效应存在性分析

图 1 为坑中坑的剖面图,当支护结构在坑顶土体荷载作用下发生位移,坑底土体隆起,同时潜在的滑裂面逐渐形成。当位移达到极限状态时,滑裂线贯通支护结构底端,形成梯形或三角形的滑裂土楔体。根据 Terzaghi 关于土拱形成机理^[10],可以认为当土体发生极限状态破坏时,支护结构上的摩擦力会使滑裂土体发生应力偏转,使屈服区域的应力向没有屈服的区域转移而表现出土拱效应。此时,与滑裂土楔体接触的内、外支护结构面以及土体潜在滑裂面可以看作滑移区土拱的拱脚。对于梯形滑裂区情况,上部矩形区的拱脚在内、外坑支护结构上,下部的拱脚在外坑支护结构面和滑裂面上。

1.2 坑中坑几何模型

为了简化理论分析,本文研究对象为贯穿型的

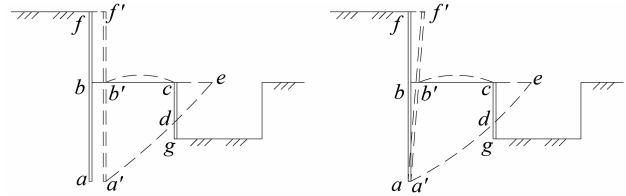


图 1 坑中坑剖面简图

Fig. 1 Profile of pit-in-pit

坑中坑,即内坑在外坑中全长分布,且长边平行于外坑边线,以此将坑中坑问题假设为平面问题。当坑间距 S 小于被动区土体滑裂面顶端与外坑支护结构距离 L 时,悬臂式支护结构的抗力完全由坑底被动区土体提供,如图 2。 H 为外坑支护结构嵌固深度, h 为内坑开挖深度, β 为滑裂面倾角。坑间距满足 $(H-h)\cot\beta \leq S \leq H\cot\beta$ 。

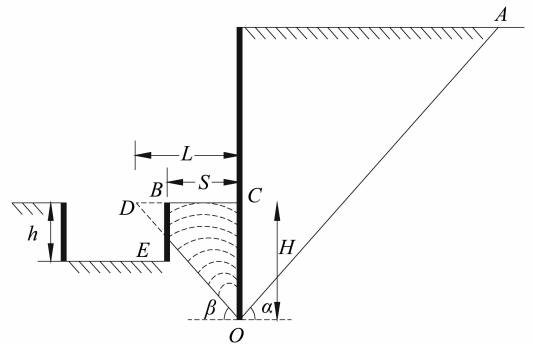


图 2 坑中坑几何模型

Fig. 2 Model of pit-in-pit

为便于力学分析,假定内、外坑支护结构均为刚体,外坑支护结构平移(T模式)且内坑支护结构水平支撑刚度很大,位移可忽略不计,同时认为①土体为无黏性土;②外坑支护结构发生极限状态的位移,形成圆弧状土拱^[15];③滑裂面与水平面夹角 $\beta = \pi/4 - \varphi/2$,滑裂面为平面且通过支护结构底端^[11];④支护结构表面粗糙,桩-土摩擦力先于土体内摩擦角完全发挥^[13-14]。

1.3 水平土压力系数

图 3 为外坑坑底某深度处被动区土体的极限应力圆,图 4 为滑裂土楔体水平土条单元在被动极限状态形成的大主应力拱。在深度 y 处取一厚度 dy 水平土条,宽度 B 。该土条在被动极限状态时形成

上凸的大主应力拱，支护结构表面 A 点为圆弧拱的起点。在支护结构表面摩擦力作用下，随支护结构位移，该土条主应力方向发生偏转，偏转角为 θ ，为土微元大主应力面与水平面的夹角； δ 为墙土间摩擦角； φ 为土体内摩擦角；在滑动面 B 点处，主应力方向不发生偏转^[11]，水平方向为大主应力，竖直方向为小主应力。

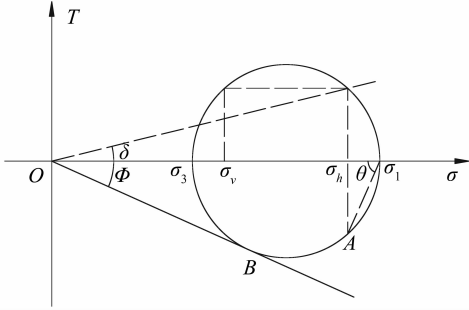


图 3 A 点极限应力圆
Fig. 3 Mohr circle of stress of point A

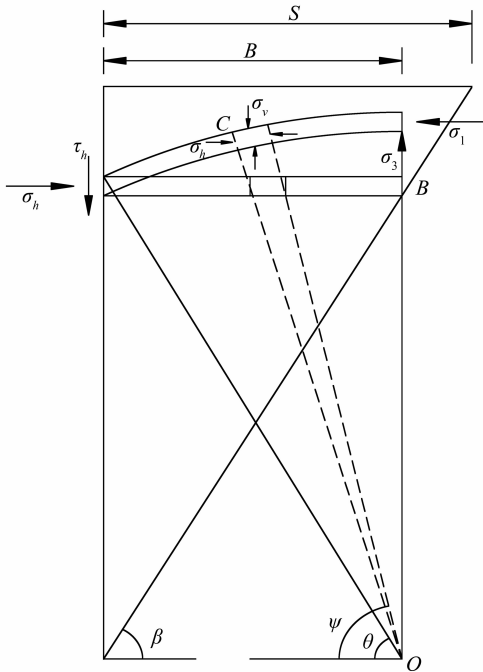


图 4 考虑土拱效应的土压力模型

Fig. 4 Model of earth pressure based on the soil arching effects

从图 3 可以看出，A 点发生滑动时其水平向应力 σ_h 、竖直向应力 σ_v 及剪应力分别为 τ_h ：

$$\begin{aligned} \sigma_h &= \sigma_1 - \tau \cot \theta \\ \sigma_v &= \sigma_1 \cos^2 \theta + \sigma_3 \sin^2 \theta \\ \tau &= (\sigma_1 - \sigma_3) \sin \theta \cos \theta \end{aligned} \quad (1)$$

令 $K_p = \sigma_1 / \sigma_3 = \tan^2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right)$ ，即朗肯被动土压

力系数。因 $\sigma_v - \sigma_3 = \sigma_1 - \sigma_h$ ，以上三式可表示为：

$$\begin{aligned} \frac{\sigma_h}{\sigma_3} &= \cos^2 \theta + K_p \sin^2 \theta \\ \frac{\sigma_v}{\sigma_3} &= \sin^2 \theta + K_p \cos^2 \theta \end{aligned} \quad (2)$$

同理，水平土体上的其他点也存在以下关系：

$$\begin{aligned} \frac{\sigma_h}{\sigma_3} &= \cos^2 \psi + K_p \sin^2 \psi \\ \frac{\sigma_v}{\sigma_3} &= \sin^2 \psi + K_p \cos^2 \psi \end{aligned} \quad (3)$$

ψ 为土体微元大主应力面与水平面夹角，其值在 θ 与 $\pi/2$ 之间。

由于土拱效应的影响，同一水平层上的竖向应力并非均匀分布，因此采用平均竖向土压力 σ_{av} 来反映，即 $\sigma_{av} = V/B$ 。图 4 中 C 点的微分单元体平均竖向应力 σ_{av} 为：

$$\sigma_{av} = \frac{1}{B} \int_{\theta}^{\pi/2} dV = \int_{\theta}^{\pi/2} \sigma_3 (\cos^2 \theta + K_p \sin^2 \theta) \frac{\sin \psi}{\cos \theta} d\psi \quad (4)$$

则水平土压力系数 K_{wp} 为：

$$K_{wp} = \frac{\sigma_h}{\sigma_{av}} = \frac{\cos^2 \theta + K_p \sin^2 \theta}{\sigma_{av} / \sigma_3} = \frac{3(\cos^2 \theta + K_p \sin^2 \theta)}{(3 - \cos^2 \theta) + K_p \cos^2 \theta} \quad (5)$$

1.4 主应力偏转角

位于外坑支护结构表面上的土体受到支护结构摩擦力影响，当被动区土体达到极限状态时，在支护结构表面上的 A 点发生滑动并在摩擦力的作用下，主应力方向发生偏转。A 点大主应力偏转角为 θ ，其剪应力与墙土摩擦角 δ 有如下关系：

$$\tau = \sigma_h \tan \delta = (\sigma_1 - \sigma_h) \tan \theta \quad (6)$$

将 (6) 式代入 (1) 式得主应力偏转角：

$$\theta = \arctan \frac{(K_p - 1) + \sqrt{(K_p - 1)^2 - 4K_p \tan^2 \delta}}{2K_p \tan \delta} \quad (7)$$

即当墙土摩擦力完全发挥时，主应力偏转角 $\theta = \frac{\pi}{4}$

$-\frac{\varphi}{2}$ ，土拱最明显；当支护结构光滑， $\delta = 0$ 时， $\theta = 90^\circ$ ，土拱消失。

2 支护结构平移模式下的被动土压力

2.1 矩形区域水平向土压力分布

将图 2 的局部抽出，如图 5，梯形区域 BCOE 为所需要计算的土楔体。EJ 将梯形分为上下两部分，上部为矩形区域，下部为三角形区域。由矩形

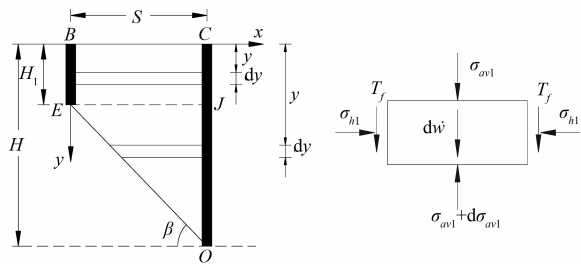


图 5 矩形区域水平土条单元计算简图

Fig. 5 Force analysis of elements in rectangular area

区水平土条微分单元在竖直方向的平衡条件得:

$$Sd\sigma_{av1} - 2\mu K_{wp}\sigma_{av1} dy = \gamma Sdy \quad (8)$$

由边界条件 $y = 0$ 时, $V = 0$ 。定 σ_{av1} 为微元上平均竖向土压力, σ_{h1} 为微元上水平土压力, $\mu = \tan\delta$ 。代入得微分方程特解:

$$\sigma_{av1} = \frac{\gamma S}{2\mu K_{wp}} \left[\exp\left(\frac{2\mu K_{wp} y}{S}\right) - 1 \right] \quad (9)$$

则水平土压力为:

$$\sigma_{h1} = \sigma_{av1} K_{wp} = \frac{\gamma S}{2\mu} \left[\exp\left(\frac{2\mu K_{wp} y}{S}\right) - 1 \right] \quad (10)$$

2.2 三角形区域水平向土压力分布

对于三角形区域:

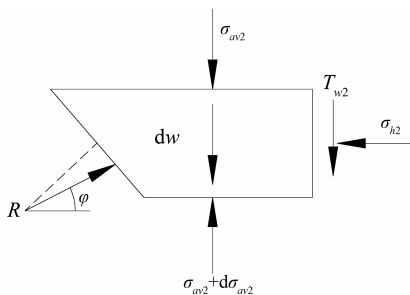


图 6 三角形区域水平土条单元计算简图

Fig. 6 Force analysis of elements in triangle

$$\sigma_{h2} dy - R \cos\varphi dy = 0 \quad (11)$$

$$dW + \tau_{w2} dy + R \sin\varphi dy - d[\sigma_{av2}(H-y)] \cot\beta = 0$$

$$dW = \gamma(H-y) \cot\beta dy \quad (12)$$

R 为滑裂面上拱脚对水平土条反力的合力。由式 (10)、(11) 得:

$$\frac{d\sigma_{av2}}{dy} = \gamma + \frac{\sigma_{av2}}{H-y} [1 - \alpha K_{wp}]$$

$$\alpha = \frac{\cos(\beta + \varphi + \delta)}{\sin(\beta + \varphi)} \times \frac{\tan\beta}{\cos\delta} \quad (13)$$

利用连续性边界条件, $y = H_1 = H - \tan\beta$, $\sigma_{av2} = \sigma_{av1}$ 求解得:

$$\sigma_{av2} = \frac{\gamma(H-y)}{-2 + K_{wp}\alpha} + A(H-y)^{-1+K_{wp}\alpha} \quad (14)$$

其中, $A = \left[\frac{\gamma S (e^{\frac{2K_{wp}H_1\mu}{S}} - 1)}{2K_{wp}\mu} - \frac{\gamma(H-H_1)}{-2 + K_{wp}\alpha} \right] / (H-H_1)^{-1+K_{wp}\alpha}$

则水平土压力:

$$\sigma_{h2} = K_{wp}\sigma_{av2} = K_{wp} \left(\frac{\gamma(H-y)}{-2 + K_{wp}\alpha} + A(H-y)^{-1+K_{wp}\alpha} \right) \quad (15)$$

2.3 被动土压力合力及合力作用点

土压力合力: $E_p = E_{p1} + E_{p2}$, 其中矩形区域:

$$E_{p1} = \int_0^{H_1} \sigma_{h1} dy = \frac{S\gamma \left(s - e^{-\frac{2H_1K_{wp}\mu}{S}} S + 2H_1K_{wp}\mu \right)}{4K_{wp}\mu^2} \quad (16)$$

三角形区域:

$$E_{p2} = \int_{H_1}^H \sigma_{h2} dy = \frac{(H-H_1)\gamma \left((-1 + e^{-\frac{2H_1K_{wp}\mu}{S}}) S + (H-H_1)K_{wp}\mu \right)}{2K_{wp}\alpha\mu} \quad (17)$$

土压力合力对支护结构底部的矩:

$$M = \int \sigma_h(H-y) dy = M_1 + M_2 \quad (18)$$

$$M_1 = \int_0^{H_1} \sigma_{h1}(H-y) dy$$

$$= \frac{1}{8K_{wp}^2\mu^3} S\gamma (2H_1(-2H+H_1)K_{wp}^2\mu^2 - S(S+2HK_{wp}\mu) + e^{-\frac{2H_1K_{wp}\mu}{S}} S(S+2(H-H_1)K_{wp}\mu))$$

$$M_2 = \int_{H_1}^H \sigma_{h2}(H-y) dy = \frac{(H-H_1)^2\gamma (3(e^{-\frac{2H_1K_{wp}\mu}{S}} - 1)s + 2(H-H_1)K_{wp}\mu)}{6(1+K_{wp}\alpha)\mu}$$

合力作用点距离支护结构底端的距离:

$$H_0 = \frac{M}{E_p} \quad (19)$$

3 算例分析

3.1 与经典土压力对比

某坑中坑基坑主要参数为: $H = 5$ m, $h = 4$ m, $S = 6$ m, $b = 3$ m, 土体重度 $\gamma = 18.18$ kN/m³, 土体内摩擦角 $\varphi = 28^\circ$, 考察不同的桩-土摩擦角对土压力的影响。

图 7 为不同桩-土摩擦角对应的土压力分布情况, 其中库伦法计算中取 $\delta = 0.75\varphi$ 。由图可见, 当 δ 较大时, 被动土压力呈现明显的非线性分布, 上部土压力相对较小, 下部明显增大。根据土拱效

应下荷载传递机理，出现图 7 所示结果可以解释为：在支护结构位移逐渐达到极限位移量的过程中，上部土体约束小而最先进入屈服，并且在支护结构表面摩擦力影响下，主应力发生偏转，土体表现为向上隆起。上部土体屈服后，土体应力向下方转移；随着深度的增加，水平土条受到上部土体因屈服而向下转移的应力越来越大，以至于支护结构底部土压力急剧增加。随着 δ 逐渐减小，土压力分布逐渐由非线性分布转为线性分布；当 δ 趋近 0 时，土压力呈线性分布，与朗肯土压力一致。说明支护结构表面光滑，即与朗肯土压力理论的假定条件一致时，支护桩表面无法形成拱脚，土拱效应消失，因此土压力呈线性分布。

土拱效应的库伦方法获得的土压力，有可能使工程偏于不安全。

表 1 土压力计算结果

Table 1 The result of earth pressure

δ/Φ	K_{wp}	$E_p/(kN \cdot m^{-1})$	M/kN	H_0/m
0.75	1.82	1 553.03	1 175.84	0.757
0.5	2.31	1 118.27	1 258.19	1.125
0.25	2.65	821.57	1 192.26	1.451
0.1	2.75	697.03	1 111.70	1.595
0.01	2.77	635.52	1 055.54	1.661
朗肯法	2.77	630	1 050.00	1.67
库伦法	5.66	1 287.31	2 145.51	1.67

3.2 内外坑间距离影响分析

图 8 为桩 - 土摩擦力 $\delta = \varphi/2$ 时不同坑间距下的被动土压力分布。当 $s = 8\text{ m}$ 时为临界坑间距，此时内坑尚未进入被动滑裂面以内，滑裂土楔体为三角形，被动土压力最小。随着坑间距逐渐减小，被动区滑裂面的发展受到内坑支护结构分割，形成梯形土楔体，被动土压力逐渐增大。由于内坑靠近外坑支护结构时，基于假定内坑支护结构支撑刚度很大的限制，导致被动区土体在土拱形成过程中，受到了内外两平行支护结构件的挤压，矩形区域形成了相对坚固的拱脚，土体应力更大程度向下传递，使得下部土体类似三向受压应力状态而表现土压力增大明显。

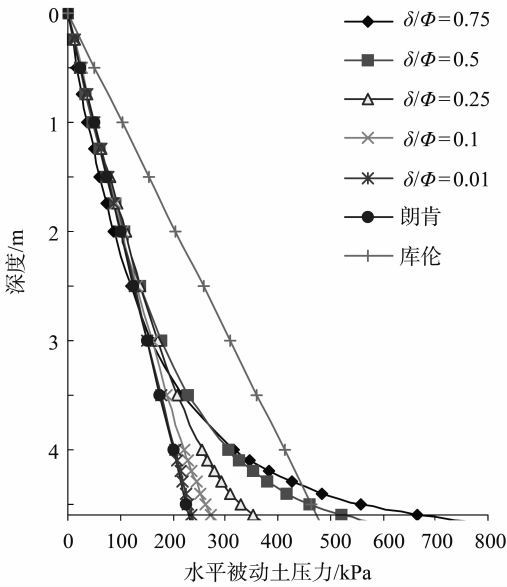


图 7 对土压力分布的影响

Fig. 7 The influence of on the distribution of earth

表 1 表示了不同情况下该算例对应的土压力合力、合力作用点及作用点高度。可以看出，当 δ 较大时土体微元水平向的大主应力发生偏转，导致水平土压力系数 K_{wp} 减小；随着 δ 减小，主应力偏转越来越不明显，土压力系数逐渐接近朗肯解。土压力合力及合力矩的值介于朗肯法及库伦法之间，合力亦随着 δ 的减小逐渐趋近朗肯解。当 δ 趋近于 0 时，合力作用点位置趋近于 $2/3$ 支护结构嵌固深度处。由于朗肯土压力理论假定桩 - 土无摩擦力，与实际情况相差较大，因此本文的研究主要与库伦土压力理论进行对比。当库伦法取 $\delta = 0.75\varphi$ 时，土压力对支护结构的合力矩 M 明显大于本文方法的计算结果。若在基坑支护结构设计中，采用不考虑

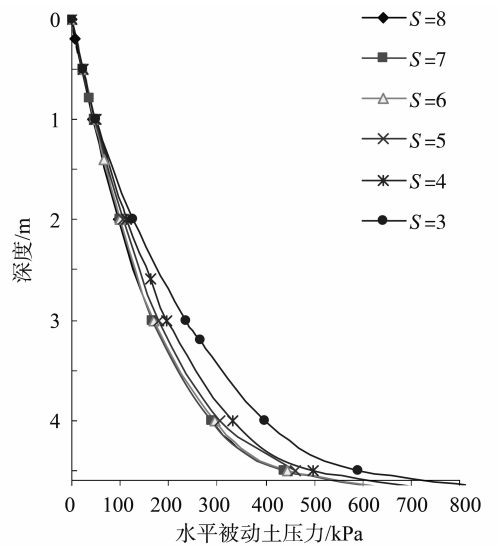


图 8 内外坑间距离对土压力的影响

Fig. 8 Effect on the earth pressure distribution of different distances

值得注意的是,这一变化规律是基于内坑支护结构的水平刚度足够大的假定得到的。这也从另一个角度说明,当内坑距离外坑较近时,提高内坑支护结构的支撑刚度,可有效提高外坑支护结构的被动抗力,从而有利于外坑支护结构的稳定。

5 结 论

1) 基于土拱效应的土压力分析方法可以综合考虑土体内摩擦角、土体重度、墙土摩擦角、坑间距以及外坑嵌固深度等参数的影响,将其应用于坑中坑被动区土压力分析中是合适的。

2) 本文研究方法与经典土压力理论计算结果对比分析表明,支护结构平移条件下,桩-土摩擦系数越大,土压力的非线性分布越明显,土拱现象越明显;随着支护结构表面渐趋光滑,本文计算结果逐渐回归朗肯解。说明本文基于土拱效应推导得到的相关表达式是合理的。

3) 支护结构表面粗糙时,库伦理论得到的抗倾覆力矩相对本文考虑土拱效应的计算结果偏大,说明根据库伦土压力进行工程设计趋于危险。

4) 本文基于内坑支护刚度大的假定得到的不同坑间距时土压力变化规律,说明提高内坑支护结构的支撑刚度,可有效提高外坑支护结构的被动抗力与稳定性。

参考文献:

- [1] 付文光,杨志银,刘俊岩. 复合土钉墙的若干理论问题、兼论《复合土钉墙基坑支护技术规范》[J]. 岩石力学与工程学报,2012,31(11):2292-2304.
- [2] 陈畅,戴斌,王卫东. 上海世博中心基坑工程设计[J]. 岩土工程学报,2010,32(增刊1):397-403.
- [3] 汤捷,蔡涛,张威,等. 武汉王家墩商务区基坑坑中坑设计治理措施[J]. 城市勘测,2012,4:161-163.
- [4] 吴铭炳,林大丰. 坑中坑基坑支护设计与监测[J]. 岩土工程学报,2006,28(增):1569-1572.
- [5] 徐飞飞,崔梓萍,徐意智,等. 坑中坑的基坑变形分布及其变化规律[J]. 地下空间与工程学报,2012,8(增刊1):1376-1388.
- [6] 金亚兵,刘吉波. 相邻基坑土条土压力计算方法探讨[J]. 岩土力学,2009,30(12):3750-3764.
- [7] 申明亮,廖少明,邵伟. 考虑内坑影响的坑中坑基坑被动土压力叠加算法[J]. 上海交通大学学报,2012,46(1):79-83.
- [8] 高印立. 有限土体土压力的计算探讨[J]. 建筑科学,2000,16(5):53-56.
- [9] HANDY R L. Arch in soil arching [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1985, 111(3):302-318.
- [10] TERZAGHI K. Theoretical soil mechanics [M]. New York: Wiley, 1943.
- [11] PAIK K H, SALGADO R. Estimation of active earth pressure against rigid retaining walls considering arching effect [J]. Geotechnique, 2003, 53(7):643-653.
- [12] 李永刚. 挡土墙被动土压力研究[J]. 岩土力学, 2003, 24(2):274-276.
- [13] 应宏伟,蒋波,谢康和. 考虑土拱效应的挡土墙主动土压力分布[J]. 岩土工程学报,2007,29(5):717-722.
- [14] 彭述权. 考虑土拱效应刚性挡墙土压力研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(10):2702-2707.
- [15] 吴明. 考虑土拱效应的挡墙后土压力研究[J]. 工程力学, 2011, 28(11):89-95.
- [16] FANG Y S, CHEN T J, WU B F. Passive earth pressure with various wall movements [J].
- [17] 徐日庆. 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):570-575.
- [18] 陈页开. 刚性挡土墙被动土压力数值分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(6):980-988.