

# 沉井下沉时土压力和侧壁摩阻力分析

梁穉稼<sup>1</sup>, 徐 伟<sup>1</sup>, 徐赞云<sup>2</sup>

(同济大学 土木工程学院, 上海 200092)

**摘要:** 基于极限平衡状态和平面滑裂面假定, 推导出单一非黏性土层中沉井下沉时的土压力和侧壁摩阻力计算公式, 采用等效内摩擦角和等效自重应力的方法将其推广至成层黏性土层中, 并与某工程实测数据进行了对比分析. 结果表明, 沉井土压力和侧壁摩阻力随着土体内摩擦角的增大而减少, 随着土体与沉井壁的外摩擦角的增大而增大; 滑裂面的滑裂角随着外摩擦角的增大而增大, 随着内摩擦角的增大先减少后增大; 理论推导的土压力接近实测土压力, 且基本介于主动土压力与静止土压力之间; 实际工程中, 在预估侧壁摩阻力时, 可以考虑 12 m 深度以下保持不变.

**关键词:** 沉井; 土压力; 侧壁摩阻力; 极限平衡状态

**中图分类号:** TU432

**文献标志码:** A

## Earth Pressure and Frictional Resistance Analysis on Open Caisson During Sinking

LIANG Sejia<sup>1</sup>, XU Wei<sup>1</sup>, XU Zanyun<sup>2</sup>

(College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 20092, China)

**Abstract:** Based on the limit equilibrium theory and the hypothesis of planar sliding plane, formulae were deduced to calculate open caisson earth pressure and frictional resistance during sinking on single non-cohesive soils. Then the formulae were extended to layered cohesive soils by the methods of equivalent internal friction angle and self-weight stress. The calculations were also compared with the measured data of a project. The results show that the earth pressure and frictional resistance decrease while internal friction angle increases, and increase while external friction angle increases. Sliding plane angle increases while external friction angle increases, decreases initially and then increases while internal friction angle increases. The theoretically deduced earth pressure between active earth pressure and earth pressure at rest is close to the measured earth pressure. In the actual projects, side wall frictional resistance can be

considered unchanged below the depth of 12 m.

**Key words:** caissons; earth pressure; side wall frictional resistance; limit equilibrium theory

将各种形状的井筒(沉井)边排土边沉入地下, 最后固定在地层中, 形成地下建筑物或构筑物的施工技术称为沉井施工技术<sup>[1]</sup>. 沉井又称开口沉箱, 已广泛用于大型地下构筑物、深基础以及顶管的工作井等. 一些小、浅沉井往往采取在沉井上面加千斤顶的下沉工艺<sup>[2]</sup>. 由于沉井施工时对周围土体的影响比较大, 一般大、深沉井都用于远离建筑物的地方, 如 2007 年 12 月开工的泰州大桥南锚碇巨型沉井<sup>[3]</sup>、2008 年 1 月开工的南京长江四桥北锚碇沉井<sup>[4]</sup>; 或者在深水中, 如 1998 年 5 月开工的海口世纪大桥主墩沉井<sup>[5-6]</sup>.

沉井从地面下沉到指定标高位置, 必须克服侧壁摩擦力和刃脚反力的作用, 沉井的侧壁摩阻力必然与侧壁土压力有关. 目前国内计算沉井土压力和侧壁摩阻力仍然使用库仑土压力等经典理论, 但理论值与实测值有较大差别. 郝志强<sup>[7]</sup>对南京长江四桥北锚碇沉井下沉过程中的侧壁土压力进行了测试, 实测的沉井土压力基本介于主动土压力和静止土压力之间. 刘青<sup>[8]</sup>实测的沉井土压力沿深度呈非线性变化. 葛春辉<sup>[9]</sup>建议施工现场获取侧壁摩阻力的方法之一是采用实测土压力, 再乘以土体与沉井壁的外摩擦系数. 而国外关于沉井下沉受力的研究也不多见<sup>[10-14]</sup>. 因此, 必须推导一套有效的沉井下沉时土压力和侧壁摩阻力计算公式, 缩小其理论值与实测值的差距.

本文基于极限平衡条件和土滑楔体的基本假定推导出单一非黏性土沉井土压力和侧壁摩阻力的计算公式, 采用等效内摩擦角和等效自重应力的方法

收稿日期: 2013-10-10

基金项目: 上海市科学技术委员会科研计划(0820121102)

第一作者: 梁穉稼(1968—), 女, 讲师, 工学博士, 主要研究方向为土木工程施工. E-mail: liangsejia@126.com

通讯作者: 徐 伟(1954—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为土木工程施工. E-mail: gdsjy@online.sh.cn

推广至沉井在成层黏性土层中的土压力和侧壁摩阻力计算, 并与工程实测数据进行对比分析。

## 1 经典土压力理论用于沉井计算的不合理处

尽管经典土压力理论公式简单、力学概念明确、应用广泛, 但用于沉井下沉时的土压力计算仍存在以下问题:

第一, 沉井下沉时, 一直处于运动当中, 而静止土压力公式是基于挡土墙与土体既无水平相对位移, 又无竖直相对位移情况下得到的, 这也意味着静止土压力公式不适合沉井的土压力计算。

第二, 一般的挡土墙, 在坑内土体开挖之前已施工完毕, 处于指定设计标高位置, 而沉井是随着坑内土体开挖下沉的, 是个动态过程, 摩擦力一直扮演着很重要的角色, 所以基于挡土墙背光滑而得到的朗肯土压力计算方法不适合沉井土压力计算。

第三, 即使是基于库仑土压力基本假定, 库仑土压力中无论是主动土压力受力模式还是被动土压力受力模式都与沉井下沉时土体的受力状况不同:

沉井壁水平方向, 由于沉井内部土体被挖, 在沉井外侧土体的作用下, 沉井有向坑内方向的位移, 可以判定土滑楔体相对其下的土体有向内下方滑动的趋势, 土楔滑块之间的受力与被动土压力受力模式不一致。

沉井壁竖直方向, 由于沉井一直往下沉, 坑外土体对沉井产生的摩阻力是沿沉井壁往上的, 与主动土压力的受力模式也不一致。

所以沉井下沉时土压力的分布不能用库仑土压力计算。

## 2 单一非黏性土层沉井土压力和侧壁摩阻力分析

### 2.1 基本假定

取与库仑土压力理论相同的基本假定:

(1) 沉井壁后土体为均匀各向同性无黏性土(黏聚力  $c=0$ )。

(2) 沉井壁后土体形成滑动土楔, 其滑裂面为通过墙踵的平面。

(3) 滑动土楔可视为刚体。

### 2.2 受力模式

如图 1a 所示, 设沉井刃脚下沉到离地面  $H$  的

高度, 沉井壁竖直, 土体表面水平, 井后土体的内摩擦角为  $\varphi$ , 重度为  $\gamma$ , 沉井壁与土体的外摩擦角为  $\delta$ 。竖直方向, 沉井在自重作用下克服侧壁摩阻力和刃脚反力的作用往下运动; 水平方向, 沉井壁在土压力作用下将向远离土体的方向发生位移, 最后土体处于极限平衡状态, 井壁后土体将形成一滑动土楔, 其滑裂面为平面  $BC$ , 滑裂面与水平面成  $\theta$  角。

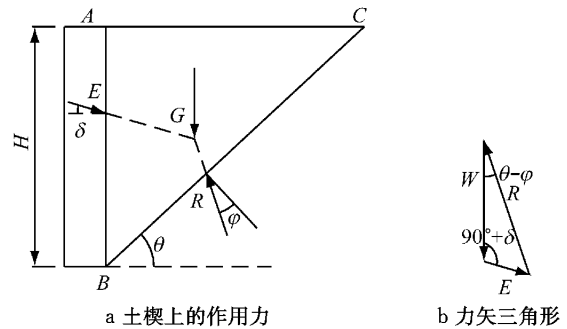


图 1 沉井土压力受力分析

Fig. 1 Force analysis of open caisson earth pressure

沿沉井长度方向取单位长度进行分析, 并取滑动土楔  $ABC$  为隔离体。作用在滑动土楔上的力有土楔体的自重  $G$ 、滑裂面  $BC$  上的反力  $R$  和井壁背面对土楔的反力  $E$  (土体作用在墙背上的土压力与  $E$  大小相等方向相反)。滑动土楔在  $G, R, E$  的作用下处于平衡状态, 三者形成一个封闭的力矢三角形, 如图 1b 所示。

### 2.3 土压力和侧壁摩阻力分析

$$\begin{aligned}
 \text{土楔自重 } G &= \gamma S_{\triangle ABC} = \gamma \frac{1}{2} \overline{AB} \overline{AC} = \\
 &= \frac{1}{2} \gamma H^2 \frac{\cos \theta}{\sin \theta} \quad (1)
 \end{aligned}$$

为了计算方便, 将  $E$  和  $R$  沿水平方向和竖直方向分解, 建立力的平衡方程

$$E_{cn} = R \sin(\theta - \varphi) \quad (2)$$

$$E_{cf} + G = R \cos(\theta - \varphi) \quad (3)$$

式中:  $E_{cn}$  为法向土压力

$$E_{cn} = E \cos \delta \quad (4)$$

$E_{cf}$  为侧壁摩阻力

$$E_{cf} = E \sin \delta \quad (5)$$

联立式(1)~(5), 可得

$$E = \frac{\frac{1}{2} \gamma H^2 \cos \theta \sin(\theta - \varphi)}{\cos \delta (\cos(\theta - \varphi) - \sin(\theta - \varphi) \tan \delta) \sin \theta} \quad (6)$$

式中: 内摩擦角  $\varphi$  和外摩擦角  $\delta$  为常数;  $E$  为滑裂角  $\theta$  的函数。对  $\theta$  求导, 整理得

$$\frac{dE}{d\theta} = \frac{M}{N}[\sin\varphi\cos(2\theta-\varphi) - \sin^2(\theta-\varphi)\tan\delta] \quad (7)$$

$$M = \frac{1}{2} \frac{\gamma H^2}{\cos\delta} \quad (8)$$

$$N = [(\cos(\theta-\varphi) - \sin(\theta-\varphi)\tan\delta)\sin\theta]^2 \quad (9)$$

令  $x = \theta - \varphi$ , 将式(7)整理得

$$\frac{dE}{d\theta} = \frac{M\cos^2 x F(x)}{N} \quad (10)$$

$$F(x) = (\tan\delta - \sin\varphi\cos\varphi)\tan^2 x - 2\sin^2\varphi\tan x + \sin\varphi\cos\varphi \quad (11)$$

显然  $\frac{M\cos^2 x}{N} \geq 0$ , 则  $\frac{dE}{d\theta} = 0$  与  $F(x) = 0$  求出的  $\theta$

是相同的。

$F(x) = 0$  有两个根, 符合力学要求的是  $E(\theta)$  取到最大值时的根。两根分别为

$$x_1 = \arctan\left(\frac{\sin^2\varphi - \sqrt{\sin^2\varphi - \tan\delta\sin\varphi\cos\varphi}}{\tan\delta - \sin\varphi\cos\varphi}\right) \quad (12)$$

$$x_2 = \arctan\left(\frac{\sin^2\varphi + \sqrt{\sin^2\varphi - \tan\delta\sin\varphi\cos\varphi}}{\tan\delta - \sin\varphi\cos\varphi}\right) \quad (13)$$

而图1中力矢三角形隐含边界条件为

$$0 < \theta - \varphi < 90^\circ - \varphi \quad (14)$$

即

$$0 < x < 90 - \varphi$$

经计算,  $x_2 < 0$ , 则  $x_1$  为所求根。

对应的最不利滑裂面的滑裂角  $\theta_{cr}$  为

$$\theta_{cr} = \arctan\left(\frac{\sin^2\varphi - \sqrt{\sin^2\varphi - \tan\delta\sin\varphi\cos\varphi}}{\tan\delta - \sin\varphi\cos\varphi}\right) + \varphi \quad (15)$$

式(6)可简化为

$$E = \frac{1}{2} \gamma H^2 \frac{\tan x}{\cos\delta (1 - \tan x \tan\delta) \tan\theta} \quad (16)$$

而

$$\tan\theta = \frac{\tan(\theta-\varphi) + \tan\varphi}{1 - \tan(\theta-\varphi)\tan\varphi} = \frac{\tan x + \tan\varphi}{1 - \tan x \tan\varphi} \quad (17)$$

联立式(12), (16), (17), 同时经过一系列复杂的三角函数换算、简化可得沉井土压力为

$$E = \frac{1}{2} \gamma H^2 K_c \quad (18)$$

$$K_c = \frac{\cos^2\varphi}{\cos\delta \left[1 + \sqrt{\frac{\sin(\varphi-\delta)\sin\varphi}{\cos\delta}}\right]^2} \quad (19)$$

式中:  $K_c$  为沉井土压力系数。

将式(18), (19)代入式(4), (5), 可得沉井法向

土压力为

$$E_{cn} = \frac{1}{2} \gamma H^2 K_{cn} \quad (20)$$

$$K_{cn} = \frac{\cos^2\varphi}{\left[1 + \sqrt{\frac{\sin(\varphi-\delta)\sin\varphi}{\cos\delta}}\right]^2} \quad (21)$$

式中:  $K_{cn}$  为沉井法向土压力系数。

沉井侧壁摩阻力为

$$E_{cf} = \frac{1}{2} \gamma H^2 K_{cf} \quad (22)$$

$$K_{cf} = \frac{\cos^2\varphi\tan\delta}{\left[1 + \sqrt{\frac{\sin(\varphi-\delta)\sin\varphi}{\cos\delta}}\right]^2} \quad (23)$$

式中:  $K_{cf}$  为沉井侧壁摩阻力系数。

将  $E_n, E_{cf}$  分别对  $H$  求导, 可求出对应高度的法向土压力强度  $p_n$  和侧摩阻力强度  $p_{cf}$ 。

$$p_n = \gamma H K_{cn} \quad (24)$$

$$p_{cf} = \gamma H K_{cf} \quad (25)$$

### 2.4 土压力系数对比分析

因  $\sin(\varphi-\delta) - \sin(\varphi+\delta) = -2\cos\delta\sin\varphi < 0$ ,  $\varphi > \delta$ , 则  $\sin(\varphi-\delta) > 0$ , 可以得到库伦主动土压力系数为

$$K_a = \frac{\cos^2\varphi}{\cos\delta \left[1 + \sqrt{\frac{\sin(\varphi+\delta)\sin\varphi}{\cos\delta}}\right]^2} < \frac{\cos^2\varphi}{\cos\delta \left[1 + \sqrt{\frac{\sin(\varphi-\delta)\sin\varphi}{\cos\delta}}\right]^2} = K_c$$

而

$$\begin{aligned} & \left[ \sqrt{\frac{\sin(\varphi+\delta)\sin\varphi}{\cos\delta}} - \sqrt{\frac{\sin(\varphi-\delta)\sin\varphi}{\cos\delta}} \right] < \\ & \left( \sqrt{\frac{\sin(\varphi+\delta)\sin\varphi}{\cos\delta}} - \sqrt{\frac{\sin(\varphi-\delta)\sin\varphi}{\cos\delta}} \right) \cdot \\ & \left( \sqrt{\frac{\sin(\varphi+\delta)\sin\varphi}{\cos\delta}} + \sqrt{\frac{\sin(\varphi-\delta)\sin\varphi}{\cos\delta}} \right) = \\ & 2\sin^2\varphi < 2 \end{aligned}$$

则

$$\sqrt{\frac{\sin(\varphi+\delta)\sin\varphi}{\cos\delta}} - \sqrt{\frac{\sin(\varphi-\delta)\sin\varphi}{\cos\delta}} < \sqrt{2}$$

有

$$\begin{aligned} & \left[ 1 + \sqrt{\frac{\sin(\varphi-\delta)\sin\varphi}{\cos\delta}} \right]^2 - \\ & \left[ 1 - \sqrt{\frac{\sin(\varphi+\delta)\sin\varphi}{\cos\delta}} \right]^2 = \\ & \left[ 2 - \left( \sqrt{\frac{\sin(\varphi+\delta)\sin\varphi}{\cos\delta}} - \sqrt{\frac{\sin(\varphi-\delta)\sin\varphi}{\cos\delta}} \right) \right] \cdot \end{aligned}$$

$$\left( \sqrt{\frac{\sin(\varphi + \delta) \sin \varphi}{\cos \delta}} + \sqrt{\frac{\sin(\varphi - \delta) \sin \varphi}{\cos \delta}} \right) > 0$$

所以, 库伦被动土压力系数为

$$K_p = \frac{\cos^2 \varphi}{\cos \delta \left[ 1 - \sqrt{\frac{\sin(\varphi + \delta) \sin \varphi}{\cos \delta}} \right]^2} >$$

$$\frac{\cos^2 \varphi}{\cos \delta \left[ 1 + \sqrt{\frac{\sin(\varphi - \delta) \sin \varphi}{\cos \delta}} \right]^2} = K_c$$

从上面的分析可知, 文中求出的沉井土压力系数介于库伦主动土压力系数和被动土压力系数之间, 即  $K_a < K_c < K_p$ . 同理可知:  $K_{an} < K_{cn} < K_{pn}$ ,  $K_{af} < K_{cf} < K_{pf}$ . 这进一步说明库伦土压力理论并不适合沉井土压力和侧壁摩阻力的计算.

实际工程中, 实测的土压力为垂直于沉井壁的法向压力, 而静止土压力也是指垂直于挡土墙的法向压力. 取有效内摩擦角  $\varphi' = \varphi$ . 图 2~4 给出了  $\varphi = 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ$  和不同  $\delta$  下,  $K_{cn}, K_{an}, K_{pn}$  及  $K_0$  的曲线图. 从图中可知,  $K_{cn}$  基本上介于  $K_{an}$  和  $K_0$  之间, 更靠近  $K_0$ , 与  $K_{pn}$  相去甚远, 表明上述理论分析的可靠性.

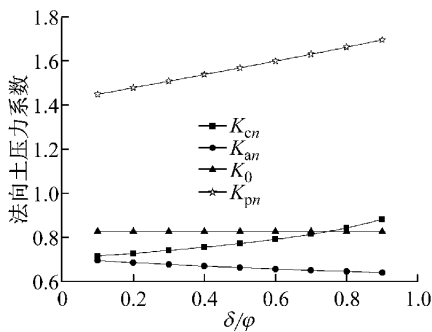


图 2  $\varphi = 10^\circ$  时井壁法向土压力系数

Fig. 2 Normal earth pressure coefficients,  $\varphi = 10^\circ$

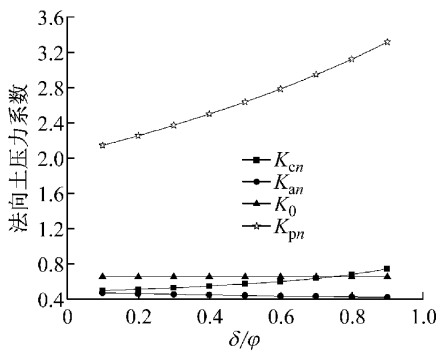


图 3  $\varphi = 20^\circ$  时井壁法向土压力系数

Fig. 3 Normal earth pressure coefficients,  $\varphi = 20^\circ$

### 2.5 $\varphi, \delta$ 对土压力和侧壁摩阻力的影响

将式(20), (22) 经过三角函数换算可得

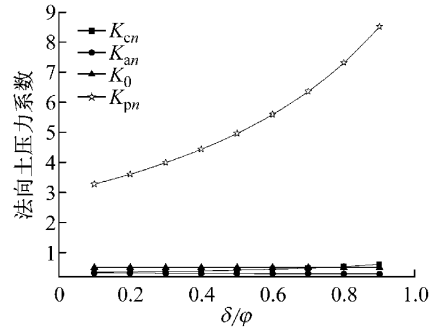


图 4  $\varphi = 30^\circ$  时井壁法向土压力系数

Fig. 4 Normal earth pressure coefficients,  $\varphi = 30^\circ$

$$K_{cn} = \frac{\cos^2 \varphi}{\left[ 1 + \sqrt{\sin \varphi - \frac{1}{2} \sin 2\varphi \tan \delta} \right]^2}$$

$$K_{cf} = \frac{\cos^2 \varphi \tan \delta}{\left[ 1 + \sqrt{\sin \varphi - \frac{1}{2} \sin 2\varphi \tan \delta} \right]^2}$$

因为  $\varphi > \delta$ , 所以当  $\delta$  不变,  $\varphi$  增大时,  $\cos^2 \varphi$  减少,  $\sin(\varphi - \delta)$  增大,  $\sin \varphi$  增大, 有  $\left[ 1 + \sqrt{\frac{\sin(\varphi - \delta) \sin \varphi}{\cos \delta}} \right]^2$  增大, 则  $K_{an}$  和  $K_{af}$  减小. 即沉井壁法向土压力和侧壁摩阻力随着土体内摩擦角的增大而减小. 基本假定中隐含沉井下沉时, 土楔体有向下滑动的趋势, 从而给沉井提供了摩阻力. 当内摩擦角增大时, 意味着土体之间的摩擦力更大、更稳定, 那么向下滑动的趋势极少或者说滑动难度增大, 土楔体与沉井之间的相对运动趋势就减弱, 提供的摩阻力和法向土压力就减小.

当  $\varphi$  不变,  $\delta$  增大时, 有  $\tan \delta$  增大,  $\left[ 1 + \left( \sin \varphi - \frac{1}{2} \sin 2\varphi \tan \delta \right)^{\frac{1}{2}} \right]^2$  减小, 则  $K_{an}$  和  $K_{af}$  增大. 即沉井壁法向土压力和侧壁摩阻力随着土体的外摩擦角增大而增大. 这相当符合摩擦的基本规律, 因为当土与沉井壁的外摩擦角增大时, 土与沉井壁之间的摩擦系数增大, 所以摩阻力就增大.

表 1 给出了不同  $\varphi, \delta$  时, 滑裂面滑裂角  $\theta_{cr}$  的变化情况. 从表中可知, 当  $\varphi$  不变,  $\delta$  增大时,  $\theta_{cr}$  随之增大. 而当  $\delta$  不变,  $\varphi$  增大时,  $\theta_{cr}$  先减少后增大.

### 2.6 单一非黏性土层沉井土压力和侧壁摩阻力的计算方法

综上所述, 基于极限平衡状态和平面滑裂面假定推导的单一非黏性土层中沉井下沉时的土压力和侧壁摩阻力的计算公式(20), (22) 更接近实测值, 且其大小随着土体内摩擦角的增大而减少, 随着土体

表 1 不同  $\varphi, \delta$  时的滑裂角  $\theta_{cr}$

**Tab.1 Different sliding plane angles in different  $\varphi, \delta$**

$\varphi/(^\circ)$	$\theta_{cr}$			
	$\delta=10^\circ$	$\delta=20^\circ$	$\delta=30^\circ$	$\delta=40^\circ$
15	63.9			
20	61.6			
25	61.8	70.5		
30	63.0	68.0		
35	64.7	67.9	74.5	
40	66.6	68.8	72.5	
45	68.6	70.2	72.5	77.5

与沉井壁的外摩擦角的增大而增大;滑裂面的滑裂角随着外摩擦角的增大而增大,随着内摩擦角的增大先减少后增大,因此比经典土压力计算方法更具合理性。

### 3 成层黏性土沉井土压力和侧壁摩阻力的计算

设沉井刃脚下沉到离地面  $Z$  的位置,从地面到刃脚经过  $n$  层土,每层土的厚度、重度、黏聚力和内摩擦角分别为  $z_i, \gamma_i, c_i, \varphi_i$ ,如图 5 所示.采用等效内摩擦角  $\varphi_d$  来综合考虑  $c, \varphi$  值对土压力的影响,即适当增大内摩擦角来综合考虑内聚力的影响;采用等效自重应力法将式(20),(22)单一非黏性土的计算公式推广至成层黏性土沉井侧壁法向土压力和侧壁摩阻力的计算。

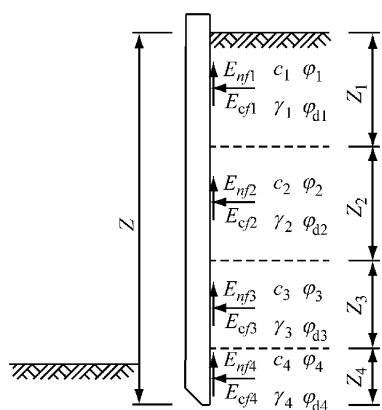


图 5 成层黏性土中法向土压力和侧壁摩阻力计算

Fig. 5 Calculations of normal earth pressures and frictional resistances in layered cohesive soils

根据抗剪强度相等的原理,第  $i$  层土的等效内摩擦角  $\varphi_{di}$  可从土的抗剪强度曲线上,通过作用在该层土的平均垂直应力  $\sigma_i$  求出。

$$\varphi_{di} = \arctan\left(\tan \varphi_i + \frac{c_i}{\sigma_i}\right) \quad (26)$$

当无地面堆载时

$$\sigma_i = \frac{\gamma_i}{2} \left( \sum_{j=1}^{i-1} z_j + \sum_{j=1}^i z_j \right) \quad (27)$$

另外,2.3 节推导出的土压力公式和侧壁摩阻力公式适合于单一均质土层,根据等效自重应力法,求成层黏性土下层土的土压力时可将上面各层土的重量当做均布荷载,以图 5 说明。

第一层土顶面处:

$$p'_{n1} = 0, \quad p'_{cf1} = 0$$

第一层土底:

$$p''_{n1} = \gamma_1 z_1 K_{cn1}, \quad p''_{cf1} = \gamma_1 z_1 K_{cf1}$$

在第  $i$  层顶面,将其上所有土层的重量换算为第  $i$  层土的当量土厚度  $z'_i$ 。

$$z'_i = \frac{\sum_{j=1}^{i-1} \gamma_j z_j}{\gamma_i} \quad (28)$$

故第  $i$  层的顶面处有

$$p'_{ni} = \gamma_i z'_i K_{cni} \quad (29)$$

$$p'_{cfi} = \gamma_1 z'_i K_{cfi} \quad (30)$$

第  $i$  层层底有

$$p''_{ni} = \gamma_i (z'_i + z_i) K_{cni} \quad (31)$$

$$p''_{cfi} = \gamma_i (z'_i + z_i) K_{cfi} \quad (32)$$

式(29)~(32)中: $p'_{ni}, p''_{ni}$ 分别为第  $i$  层层顶、层底土法向土压力强度; $p'_{cfi}, p''_{cfi}$ 分别为第  $i$  层层顶、层底土侧壁摩阻力强度; $K_{cni}$ 为第  $i$  层土法向土压力系数; $K_{cfi}$ 为第  $i$  层土侧壁摩阻力系数。

每层土总的法向土压力  $E_{cni}$  等于法向土压力强度分布图的面积,每层土总的侧壁摩阻力  $E_{cfi}$  等于竖向侧壁摩阻力强度分布图的面积。

### 4 工程实例分析

西安市北三环雨水工程 C09 标段雨水干管沉井 YF70<sup>[8]</sup>,几何尺寸为  $10.6 \text{ m} \times 9.1 \text{ m} \times 15.45 \text{ m}$ ,沉井每个侧壁设置土压力盒 3 层,垂直间距为  $2.0 \sim 2.5 \text{ m}$ ,共埋设土压力盒 24 个,其中某一侧的土压力盒位置如图 6 所示.取竖向处同一位置的测点 20,36,38 的实测土压力数据进行分析。

该处土层分 3 层,第 1 层为素填土,层厚  $0.5 \text{ m}$ ;第 2 层为黄土状粉质黏土,层厚  $14.0 \text{ m}$ ;第 3 层为细砂层,层厚  $15.0 \text{ m}$ ,由沉井下沉高度可知,沉井测点并没有深入到第 3 层土中.同时,第 1 层素填土的土性参数缺失,考虑到该土层厚度只有  $0.5 \text{ m}$ ,若将该土层归并到第 2 层土中进行计算,对结果影响不大.地下水位在勘察期间稳定在  $14.5 \text{ m}$  以下。

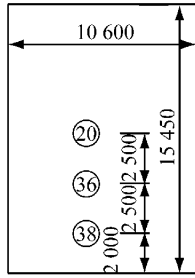


图 6 测点布置图(单位:mm)

Fig. 6 Layout of monitoring points(unit: mm)

第 2 层土的固结快剪土性参数为: 重度  $\gamma=18 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-3}$ , 黏聚力  $c=36 \text{ kPa}$ , 内摩擦角  $\varphi=33.2^\circ$ 。通过计算可知, 其等效内摩擦角  $\varphi_d=43.5^\circ$ 。韩晓雷等<sup>[15]</sup>采用大型直剪仪, 对该工程的原状土与现场采集的混凝土进行了外摩擦系数的分析, 测得平均外摩擦系数  $\mu=\tan \delta=0.67$ , 则外摩擦角  $\delta=33.8^\circ$ 。

图 7 为该工程案例按文中方法计算的土压力与实测土压力、静止土压力以及主动土压力的对比, 从图中可以看出, 实测的土压力沿深度方向并不是完全线性, 完全光滑的, 但基本是增大的, 且基本介于主动土压力和静止土压力之间。按文中方法计算的土压力也基本介于主动土压力和静止土压力之间, 且比按经典方法计算的土压力更接近实测的土压力, 计算过程同样很简洁。

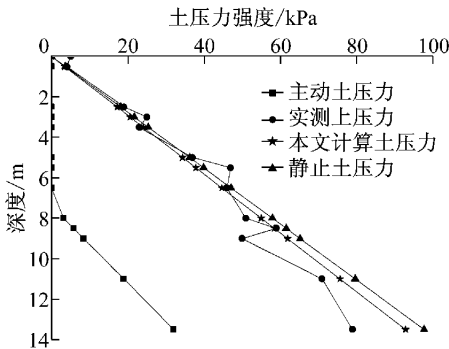


图 7 土压力对比

Fig. 7 Comparison of different earth pressures

实际工程中, 沉井下沉时土压力的计算如直接采用主动土压力或静止土压力, 存在过大或过小的问題, 造成安全性或经济性的欠缺。土压力的精确计算一直都是理论界的难题, 与传统理论相比, 本文计算方法显然有效地缩小了土压力的理论值与实测值之间的差距。

同时, 从图 7 可以看出, 自 12 m 以下, 随着深度增加, 侧壁土压力值基本不增加或增加很少。该工程土层为单一土层, 比较具有典型性, 其外摩擦角不

变, 意味着自 12 m 以下, 侧壁摩阻力不变。设计规程<sup>[16]</sup>建议的分布形式, 是自 5 m 以下, 侧壁摩阻力保持不变, 因而可以考虑在实际工程中, 先求出 12 m 深度处的侧壁摩阻力, 然后自 12 m 以下, 其侧壁摩阻力保持不变。

当然, 计算侧壁摩阻力的主要参数是外摩擦系数。实际工程中, 往往会采取泥浆套、空气幕等工艺去减少沉井壁与土的摩擦, 接触面由土-混凝土转变为土-泥浆-混凝土或土-空气-混凝土, 直接与外侧土层接触的是泥浆或者空气, 那么此时的外摩擦系数就是土-泥浆或土-空气的摩擦系数, 所以, 应该根据实际采取的减摩工艺准确测定外摩擦系数。

## 5 结论

沉井不同于一般的挡土墙, 它经历了随挖随下沉的动态过程。本文分析了经典土压力理论用于沉井土压力计算的不合理处; 基于极限平衡条件和土滑楔体的基本假定推导出单一非黏性土沉井土压力和侧壁摩阻力的计算公式; 并采用等效内摩擦角和等效自重应力的方法推广至沉井在成层黏性土层中的土压力和侧壁摩阻力计算。主要结论如下:

(1) 其他参数不变时, 沉井土压力和侧壁摩阻力随着土体内摩擦角的增大而减少, 随着土体外摩擦角的增大而增大。

(2) 其他参数不变时, 滑裂面的滑裂角随着外摩擦角增大而增大, 随着内摩擦角的增大先减少后增大。

(3) 按本文方法求出的土压力一般介于库仑主动土压力和静止土压力之间, 更靠近静止土压力, 而实测的土压力也介于主动土压力与静止土压力之间, 与文中计算的结果接近, 表明本文计算方法的合理性。

(4) 侧壁摩阻力的预估可以考虑先求出 12 m 深度处的侧壁摩阻力, 然后自 12 m 以下, 其侧壁摩阻力保持不变。

值得注意的是, 实际工程中土体的应力状态很复杂, 土压力沿深度方向并不总是在增大, 而且, 土中一般还有地下水, 如何考虑地下水对土压力和侧壁摩阻力的影响有待进一步研究。沉井工程虽然数量很多, 但真正实施了全过程监测的工程却很少, 因而能够用于分析的实测数据也非常少, 需要给以更多的关注。

## 参考文献:

- [1] 周申一,张立荣,杨仁杰,等.沉井沉箱技术[M].北京:人民交通出版社,2005.  
ZHOU Shenyi, ZHANG Lirong, YANG Renjie, *et al.* Open caisson and caisson construction technique [M]. Beijing: China Communications Press, 2005.
- [2] Allenby D, Waley G, Kilburn D. Examples of open caisson sinking in Scotland [J]. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers—Geotechnical Engineering*, 2009, 162(1):59.
- [3] 陶建山.泰州大桥南锚碇巨型沉井排水下沉施工技术[J].铁道工程学报,2009,124(1):63.  
TAO Jianshan. Construction technology for draining-sinkage for south caisson anchorage to Taizhou Yangtze River Highway Bridge with large-size sunk well [J]. *Journal of Railway Engineering Society*, 2009, 124(1):63.
- [4] 穆保岗,朱建民,牛亚洲.南京长江四桥北锚碇沉井监控方案及成果分析[J].岩土工程学报,2011,33(2):269.  
MU Baogang, ZHU Jianmin, NIU Yazhou. Monitoring and analysis of north anchorage caisson of Fourth Nanjing Yangtze River Bridge [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2011, 33(2):269.
- [5] 夏卫,苏洪雯,陈锡墀,等.海口世纪大桥主墩沉井施工[J].桥梁建设,2002(6):50.  
XIA Wei, SU Hongwen, CHEN Xishi, *et al.* Construction of pylon pier caisson of Haikou Shiji Bridge [J]. *Bridge Construction*, 2002(6):50.
- [6] 李宗哲,郑俊杰,付琼阁.深水超大沉井下沉监测与分析[J].水运工程,2009(10):78.  
LI Zhongzhe, ZHENG Junjie, FU Qiongg. Monitoring and analysis of sinking of superlarge caisson in deep water [J]. *Port & Waterway Engineering*, 2009(10):78.
- [7] 郝志强.大型沉井结构下沉过程中的受力特性研究[D].南京:东南大学,2010.  
HAO Zhiqiang. Research on the mechanical properties of sinking process of large caisson structure [D]. Nanjing: Southeast University, 2010.
- [8] 刘青.沉井结构侧壁土压力分布研究[D].西安:西安建筑科技大学,2010.
- [9] 葛春辉.钢筋混凝土沉井结构设计施工手册[M].北京:中国建筑工业出版社,2004.  
GE Chunhui. Design and construction manual on reinforced concrete open caisson [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2004.
- [10] Newman T G, Wong H Y. Sinking a jacked caisson within the London Basin geological sequence for the Thames Water Ring Main extension[J]. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 2011, 44(2):221.
- [11] YE Jiawei, CHEN Yuanming, WANG Dongjiao, *et al.* Wave motion compensation scheme and its model tests for the salvage [J]. *China Ocean Engineering*, 2006, 20(4):635.
- [12] Saran S, Bhandari N M. Al-Smadi MMA. Analysis of eccentrically obliquely loaded ring footings on sand[J]. *Indian Geotechnical Journal*, 2003, 33(4):422.
- [13] Boushehrian J H, Hataf N. Experimental and numerical investigation of the bearing capacity of model circular and ring footings on reinforced sand[J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2003, 21(4):241.
- [14] Kumar J, Ghosh P. Bearing capacity factor  $N_\gamma$  for ring footings using the method of characteristic[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2005, 40(3):1474.
- [15] 韩晓雷,孔增奇,席亚军,等.改进直剪仪在沉井侧摩阻力研究中的应用[J].长春工程学院学报:自然科学版,2009,10(2):1.  
HAN Xiaolei, KONG Zengqi, XI Yajun, *et al.* The application of the improved direct shear apparatus during research on open caisson side friction [J]. *Journal of Changchun Institute of Technology: Natural Science*, 2009, 10(2):1.
- [16] 中国工程建设标准化协会. CECS 137—2002 给水排水工程钢筋混凝土沉井结构设计规程[S].北京:中国建筑工业出版社,2003.  
China Association for Engineering Construction Standardization. Specification for structural design of reinforced concrete sinking well of water supply and sewerage engineering [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2003.