

DOI: 10.11779/CJGE201602020

# 被动土拱效应对土压力计匹配误差的影响

张海丰, 马保松\*, 王福芝

(中国地质大学(武汉)工程学院, 湖北 武汉 430074)

**摘要:** 土压力计在量测土体自由场应力时, 由于土压力计壳体的刚度远大于周围土体介质的刚度, 导致在土压力计壳体圆周的上方产生被动土拱效应。被动土拱效应使土压力计周围土体荷载部分传递到土压力计上, 致使土压力计的测量值大于真实值。根据土拱理论推导了被动土拱效应引起的匹配误差计算公式, 与传统的匹配误差计算公式相比, 新推导公式考虑了土体的内摩擦角和黏聚力, 揭示了土体与土压力计的相互作用。提高土压力计外侧土体的密实度, 降低土压力计上部土体的密实度可以消减被动土拱效应; 增大土压力计直径与膜片直径的比值可以减小被动土拱效应对测量误差的影响。

**关键词:** 土压力计; 量测误差; 被动土拱效应

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2016)02-0350-05

**作者简介:** 张海丰(1989-), 男, 硕士研究生, 主要从事地质工程和非开挖方面的学习和研究。E-mail: xfhaifeng@126.com。

## Influence of passive soil arching effect on matching error of earth pressure cells

ZHANG Hai-feng, MA Bao-song, WANG Fu-zhi

(Faculty of Engineering, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, China)

**Abstract:** In measuring free-field in-situ stresses, the passive arching effect is aroused over the cylinder surface of earth pressure cells because the stiffness of the pressure cell shell is much greater than that of the surrounding soil. Partial soil weight is transformed to the pressure cells owing to the passive soil arching, resulting in larger measuring values of earth pressure. According to the soil arching theory, an equation for calculating the measuring error induced by the passive soil arching is deduced. Compared with the existing formulas, the new equation includes soil friction angle and cohesion rather than the elastic modulus, and reveals the interaction between the soil and the pressure cell. It is helpful to increase the compactness of the soil surrounding the pressure cells, and to decrease the density of the soil upon the pressure cells for weakening the passive soil arching effect. Moreover, enlarging the diameter ratio of pressure cells to cell diaphragm can diminish the influence of the passive soil arching.

**Key words:** earth pressure cell; measuring error; passive soil arching effect

## 0 引言

土压力的测量一直是岩土工程的重点工作之一, 目前广泛使用土压力计量测土压力。自1916年Goldbeck<sup>[1]</sup>发明压力平衡式土压力计至今, 土压力计已广泛应用于工程施工和实验研究中<sup>[2-6]</sup>。有关土压力计的研制和研究从未中断过, 土压力计的测量误差就是其中的一个热点。匹配误差与土压力计的参数、土体参数和应力历史有关, 匹配误差的计算公式为<sup>[6-9]</sup>

$$\beta = (\sigma - \sigma_0) / \sigma_0, \quad (1)$$

式中,  $\beta$  是匹配误差,  $\sigma$  是土压力计测量值,  $\sigma_0$  是土体应力真实值。引起匹配误差的原因有两类: ①土压力计膜片挠曲变形引起的主动土拱效应; ②土压力计壳体刚度与周围土体刚度不匹配引起的被动土拱效

应。主动土拱效应将膜片上方土体重量部分传递到外侧土体中, 使测量值小于真实值。被动土拱效应使得壳体外侧的土体重量部分传递到壳体上方, 使得测量值大于真实值。由于主动土拱效应和被动土拱效应都作用在土压力计上方的土体中, 主动土拱效应和被动土拱效应又将相互影响, 使匹配误差的计算更加复杂。

匹配误差的研究已有近百年的时间, 诸多研究者从弹性理论的角度将土压力计的匹配误差看作钢模压陷问题求解。如Kogler<sup>[1]</sup>得出土压力计的刚度大于土体刚度时引起正的匹配误差; Taylor<sup>[1]</sup>给出了量测值与

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51074144)

收稿日期: 2015-03-03

\*通讯作者

真实值的比值公式(式(2));余尚江等<sup>[6]</sup>和曾辉等<sup>[7,10]</sup>给出了匹配误差的计算公式(式(3));Monfore等<sup>[11]</sup>和Loh等<sup>[11]</sup>也给出了与Taylor解析表达式相类似的解析公式。

$$\frac{\sigma}{\sigma_0} = \frac{\frac{E_m}{E_s} - 1}{2 \frac{E_m}{N} \frac{D}{h} + 1} \quad ; \quad (2)$$

$$\beta = \frac{\frac{d}{D} \cdot \frac{E_m}{E_s} - 1}{2A \frac{d}{h} \cdot \frac{E_m}{E_s} + 1} \quad . \quad (3)$$

式中  $E_m$  是膜片的弹性模量,  $E_s$  是土体的弹性模量,  $N$  是与土卸荷拱有关的系数;  $D$  是土压力计的直径;  $d$  是土压力计膜片的直径;  $h$  是土压力计的厚度;  $A$  是压陷系数。然而由于土体的碎散性以及土体和土压力计变形过程中的耦合作用<sup>[11-14]</sup>, 现有的研究还存在着不足: 未能清晰阐述匹配误差产生时土压力计与土体的相互作用机理; 匹配误差还与土体类型、土体密实度、土体粒径级配、应力历史有关, 解析公式对这些因素考虑不足<sup>[15-19]</sup>。论文根据土拱理论<sup>[11, 14-16]</sup>, 研究土压力计与土体产生的被动土拱效应, 给出计算被动土拱效应引起匹配误差的计算公式, 以及消减被动土拱效应的方法, 对已有的研究成果进行补充。

## 1 土拱效应的产生与计算

土拱效应指的是如果支撑土体中的一部分土体发生了屈服, 而周围的土体保持不动, 发生屈服的土体会与周围的土体产生相对位移。屈服部分土体与周围土体界面间的剪切阻力阻碍这种相对位移, 应力从土体中屈服的部分转移到周围土体上的现象<sup>[16]</sup>。

### 1.1 主动土拱效应产生机理

土压力计承受土体荷载后, 膜片产生凹型的挠曲变形, 膜片上部的土体填充到膜片挠曲变形产生的空腔中, 土压力计上部土体内部产生相对剪切位移, 如图1中膜片圆周处的“剪切破坏面”, 于是膜片上方土柱重量部分传递到外侧的土体中, 膜片承受的土体重量降低, 量测值小于真实值。

### 1.2 被动土拱效应产生机理

土压力计壳体外侧的土体在承受荷载时产生压缩变形, 而壳体的刚度远大于土体的刚度, 壳体产生的压缩变形远小于土体的压缩变形, 于是在壳体的外侧圆周上形成剪切破坏面, 如图1中土压力计壳体外侧的“剪切破坏面”。剪切破坏面外侧土体的重量通过剪应力部分传递到剪切破坏面内侧的土体上, 使得作用在土压力计上的荷载增大。需要指出的是剪切破坏

面的方向和高度取决于土体的膨胀角和土体的压缩变形量。由于土体的碎散性, 剪切破坏面自壳体圆周处产生, 呈羽状向外侧发展成多簇剪切破坏面, 为了简化, 图1中给出了呈竖直方向发展的剪切破坏面, 仅给出了一簇作用在土体单元左右两侧的剪应力。这些简化条件使得土拱效应的产生机理简单明了, 引起的误差也在可接受的范围内。

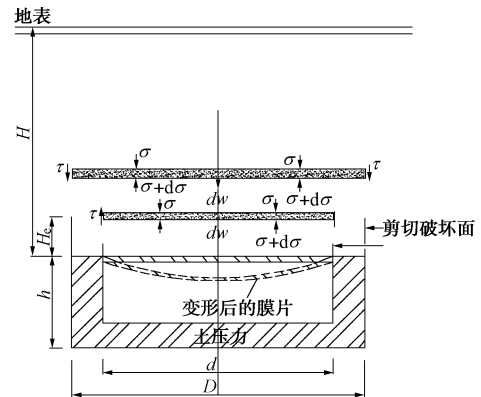


图1 土压力计与土体相互作用引起的土拱效应

Fig. 1 Soil arching mobilized by interaction between earth pressure cell and soil mass

对于平动式土压力计, 承压板产生平动位移。这种平动位移也会产生主动土拱效应, 壳体外侧的土体压缩也将引起被动土拱效应。与膜片式土压力计引起的土拱效应的区别在于, 平动式土压力计的承压板直径与壳体直径相同, 简化后的主动土拱效应和被动土拱效应作用在直径相等的圆柱体单元上。而膜片式土压力计的膜片直径小于壳体直径, 简化后的主动土拱效应和被动土拱效应作用在直径不等的圆柱体单元上。

### 1.3 被动土拱效应引起的匹配误差计算

应用极限平衡理论, 在土压力计上方取圆柱形单元体, 单元体的上下表面受到法向应力, 单元体的圆周处受到竖直向下的剪应力, 单元体还受到土体的自重。土体受力平衡微分方程为<sup>[15-16, 20]</sup>

$$\frac{d\sigma}{dz} = \gamma + \frac{4c}{D} + 4K\sigma \frac{\tan\phi}{D} \quad , \quad (4)$$

该方程为一个一阶常微分方程, 边界条件为  $Z=0$  时,  $\sigma=q$ 。求解上述微分方程得到任意深度处的竖向土压力:

$$\sigma = \frac{\left( e^{\frac{4K H_e \tan\phi}{D}} - 1 \right)}{4K \tan\phi \frac{H_e}{D}} \left( \gamma H_e + 4c \frac{H_e}{D} \right) + \gamma (H - H_e) e^{\frac{4K H_e \tan\phi}{D}} \quad , \quad (5)$$

式中,  $K$  是土的侧压力系数,  $\phi$  是土体的内摩擦角,  $\gamma$

是土的重度,  $c$  是土体的黏聚力,  $H$  是土压力计的埋深,  $\gamma(H-H_e)=q$ ,  $H_e$  是剪切带的发展高度<sup>[20]</sup>, 由下式计算:

$$e^{4K\frac{H_e}{D}\tan\phi} - 4K\frac{H_e}{D}\tan\phi = 4K\tan\phi\gamma_{st}\zeta + 1, \quad (6)$$

式中,  $\gamma_{st}$  是沉降比, 为一实验系数, 可取 0.5~0.8,  $\zeta$  是突出比, 取 1。式 (6) 没有考虑黏聚力, 对于黏性地层将黏聚力折合成内摩擦角进行计算。如果不考虑地层的黏聚力, 式 (5) 可以简化为

$$\frac{\sigma}{\gamma H} = \frac{\left(e^{4K\frac{H_e}{D}\tan\phi} - 1\right)\frac{H_e}{H} + (H-H_e)e^{4K\frac{H_e}{D}\tan\phi}}{4K\tan\phi\frac{H_e}{D}}. \quad (7)$$

等沉面的高度与沉降比呈正相关, 与内摩擦角呈负相关。图 2 给出了取静止侧压力系数时内摩擦角等于 20°, 30° 和 40° 时的等沉面高度与土压力计直径的比值。土体内摩擦角越大等沉面的高度越小, 对于图中给定的参数, 等沉面的高度约为土压力计直径的 0.7~1.1 倍。将等沉面的高度带入式 (7) 中得到量测误差随等沉面高度的变化关系, 如图 3。从图中可以得出量测误差随等沉面高度的增加快速增大, 且内摩擦角越大, 增加趋势越显著; 量测误差随土压力计埋深增加而略微增加。对于图 2 计算得到的等沉面高度, 量测误差  $\sigma/\gamma H$  约为 1.8~3.7。

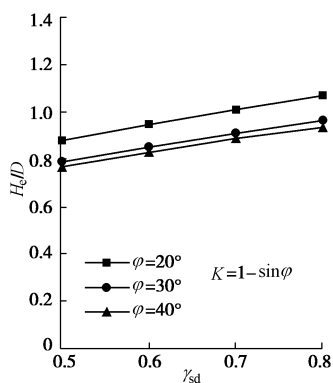


图 2 不同沉降比下的等沉面高度

Fig. 2 Depths of equal settlement surface under different settlement ratios

## 2 消减被动土拱效应的方法

### 2.1 增大土压力计周围土体的密实度

由于被动土拱效应由土压力计壳体周围土体在上覆荷载下产生压缩位移导致, 因此通过提高土压力计周围土体的相对密实度, 可以减小土体的压缩变形量, 实现减小被动土拱效应的目的。图 3 中的计算结果也表明, 减小量测误差的有效方式是降低等沉面的高度

与土压力计直径的比值。因此, 建议在有条件的场地, 在安装土压力计时将土压力计壳体的外侧土体压实, 以减小压缩位移量。

另外, 降低剪切带产生区域的土体内摩擦角也可以减小土压力计的量测误差, 如图 3。因此建议使用松散的、颗粒细小的土体填筑在土压力计的上方以降低土体的内摩擦角, 实现减小被动土拱效应的目的。

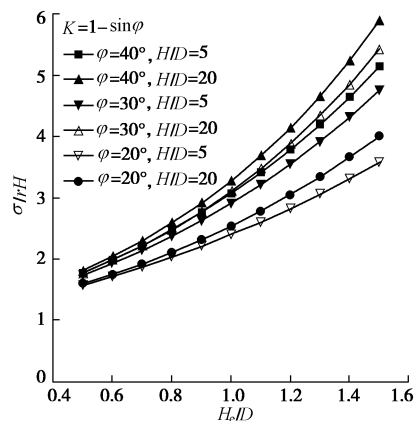


图 3 被动土拱效应引起的量测误差随等沉面高度的变化关系

Fig. 3 Relationship between measuring errors and different equal settlement surfaces induced by passive soil arching effect

### 2.2 增大土压力计的直径比

主动土拱效应和被动土拱效应可能在膜片的上方相互影响, 使得土压力计的量测误差难以确定。由于主动土拱效应由膜片的挠曲变形引起, 难以完全消除, 因此需要通过改变土压力计的结构形式降低被动土拱土拱效应对主动土拱效应的影响, 使量测误差的影响因素简单化。土拱理论表明, 被动土拱效应引起的应力扰动区域与剪切带的发展高度有关。假定剪切破坏面簇中发展最远的一簇竖直向上, 根据剪切破坏面的高度和土体的速度特征线确定被动土拱效应引起的扰动土体范围<sup>[18, 21]</sup>, 如图 4。

最外侧的速度特征线  $AB$  线在土压力计表面的投影长度  $L$  为

$$L = \frac{H_e}{\tan(45^\circ + \psi/2)}, \quad (8)$$

式中,  $\psi$  是土体的膨胀角。当量测值不受被动土拱效应影响时, 要求土压力计膜片直径与土压力计直径的比值满足:

$$\frac{d}{D} < 1 - 2\frac{L}{D}. \quad (9)$$

式 (8)、(9) 表明土压力计的直径比与等沉面的高度与厚度的比值呈负相关, 与膨胀角呈正相关。建议将土压力计的传感膜片布置在远离被动土拱效应的影响区域, 以减小被动土拱效应对量测值的影响。

另外, 将图 2 中的计算结果带入式 (8)、(9), 得

到土压力计的直径比可能小于零, 说明当剪切破坏面的发展高度较大时, 难以通过土压力计的构造完全消除被动土拱效应的影响。这表明在量测自由场应力时, 影响土压力计的量测误差的因素更多, 量测误差也难以确定。

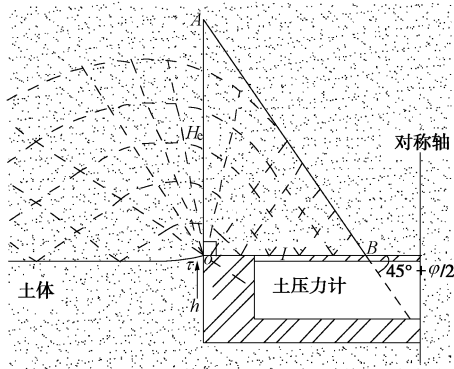


图4 被动土拱效应产生的速度特征线

Fig. 4 Velocity characteristics induced by passive soil arching

### 3 讨 论

计算式(4)~(7)以极限平衡理论为假设推导得到, 这与土体的弹塑性破坏不完全符合, 计算结果偏大。与传统的基于钢模压陷问题得到的匹配误差计算公式相比, 上述公式考虑了土体的内摩擦角和黏聚力。这两个参数比单一的土体的弹性模量更能反映土体的类型、密实度、含水率等参数的变化。上述公式还揭示了土压力计在量测自由场应力时引起匹配误差的机理, 有助于从业人员正确的选用土压力计进行土压力的计算。

### 4 结 论

土压力计的应用已有近百年的时间, 有关土压力计匹配误差的研究也已从经典的钢模压陷理论发展到土压力计与土体相互作用的弹塑性理论。论文分析了土压力计壳体刚度与周围土体刚度不匹配引起的被动土拱效应的机理, 推导了计算被动土拱效应引起匹配误差的计算公式, 给出了消减被动土拱效应的方法:

(1) 土压力计在量测土体自由场应力时, 土压力计壳体刚度远大于周围土体介质的刚度是引起被动土拱效应的原因。

(2) 根据土拱理论推导了被动土拱效应引起的匹配误差的计算公式, 可以用来计算被动土拱效应引起的匹配误差。

(3) 增大土压力计壳体外围土体的密实度, 降低土压力计上方土体的密实度可以减小土拱效应。增大

土压力计直径与膜片直径的比值可以减小被动土拱效应对量测值的影响。

### 参考文献:

- [1] PEATTIE K R, SPARROW R W. The fundamental action of earth pressure cells[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1954, 2(3): 141 - 155.
- [2] 张胜利. 土压力传感器与土介质相互作用特性分析[D]. 重庆: 西南交通大学, 2010. (ZHANG Sheng-li. Properties analysis on interaction of sensor and soil pressure soil medium[D]. Chongqing: Southwest Jiaotong University, 2010. (in Chinese))
- [3] 丁世敬, 赵跃智, 汪恩清. 饱和土有效应力传感器的研制[J]. 传感技术学报, 2008, 21(10): 1704 - 1707. (DING Shi-jing, ZHAO Yue-zhi, WANG En-qing. Researcher on effective stress sensor in saturated soil[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2008, 21(10): 1704 - 1707. (in Chinese))
- [4] 余尚江, 曾 辉. 饱和土有效应力传感器[J]. 传感器技术, 2003, 22(3): 10 - 13. (YU Shang-jiang, ZENG Hui. Effective stress transducer in saturated soils[J]. Journal of Transducer Technology, 2003, 22(3): 10 - 13. (in Chinese))
- [5] 黄 雨, 李光辉, 郑 虎. 砂土流滑运动的模型试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2010, 50(6): 65 - 69. (HUANG Yu, LI Guang-hui, ZHENG Hu. Model tests on sand flow[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2010, 50(6): 65 - 69. (in Chinese))
- [6] 余尚江, 曾 辉. 土中自由场应力与结构表面压力测量的差异[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(6): 654 - 657. (YU Shang-jiang, ZENG Hui. The difference between measurements of stress in soil and pressure on wall-surface[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, 25(6): 654 - 657. (in Chinese))
- [7] 曾 辉. 土中结构表面压力测试技术的研究[J]. 土木工程学报, 1998, 31(2): 59 - 68. (ZENG Hui. Surface pressure measurement for buried structures[J]. China Civil Engineering Journal, 1998, 31(2): 59 - 68. (in Chinese))
- [8] 曾 辉, 李欢秋. 岩土中结构表面刚性压力传感器动匹配问题的数值计算研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1996, 15(增刊): 559 - 564. (ZENG Hui, LI Huan-qiu. On dynamic match of rigid pressure gauge mounted on the surface between structure and geo-material by FEM[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1996, 15(S0): 559 - 564. (in Chinese))

- [9] 曾 辉, 余尚江, 陈佳妍. 岩土压力传感器静匹配问题的研究进展[J]. 岩土力学, 2005, **26**(7): 1173 - 1176. (ZENG Hui, YU Shang-jiang, CHEN Jia-yan. Development of research on pressure transducer static matching error in rock and soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, **26**(7): 1173 - 1176. (in Chinese))
- [10] 曾 辉, 余尚江. 岩土压力传感器匹配误差的计算[J]. 岩土力学, 2001, **22**(1): 99 - 106. (ZENG Hui, YU Shang-jiang. The calculation of matching error of rock-soil pressure transducer[J]. Rock and Soil Mechanics, 2001, **22**(1): 99 - 106. (in Chinese))
- [11] LABUZ J F, THEROUX B. Laboratory calibration of earth pressure cells[J]. Geotechnical Testing Journal, 2005, **28**(2): 188 - 196.
- [12] TALESNICK M L, RINGEL M, AVRAHAM R. Measurement of contact soil pressure in physical modelling of soil-structure interaction[J]. International Journal of Physical Modelling in Geotechnics, 2014, **14**(1): 3 - 12.
- [13] TALESNICK M. Measuring soil pressure within a soil mass[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2013, **50**(7): 716 - 722.
- [14] PARDO G S, SÁEZ E. Experimental and numerical study of arching soil effect in coarse sand[J]. Computers and Geotechnics, 2014, **57**: 75 - 84.
- [15] MARSTON A, ANDERSON A O. The theory of loads on pipes in ditches: and tests of cement and clay drain tile and sewer pipe[R]. Ames: Iowa State College of Agriculture and Mechanic Arts, 1913.
- [16] TERZAGHI K. Theoretical soil mechanics[M]. New York: Wiley, 1943.
- [17] KOUTSABELOULIS N C, GRIFFITHS D V. Numerical modelling of the trap door problem[J]. Géotechnique, 1989, **39**(1): 77 - 89.
- [18] COSTA Y D, ZORNBERG J G, BUENO B S, et al. Failure mechanisms in sand over a deep active trapdoor[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2009, **135**(11): 1741 - 1753.
- [19] TIEN H J S. The arching mechanism on the micro level utilizing photoelasticity modeling[D]. Lowell: University of Massachusetts, 2001.
- [20] 陈仲颐. 土力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1994. (CHEN Zhong-yi. Soil mechanics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1994. (in Chinese))
- [21] IGLESIA G R, EINSTEIN H H, WHITMAN R V. Validation of centrifuge model scaling for soil systems via trapdoor tests[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2011, **137**(11): 1075 - 1089.

## 本期广告索引

- 封 2 北京筑信达工程咨询有限公司  
封 3 北京理正软件股份有限公司  
封 4 上海分元土木工程科技有限公司  
后插 1 台州建元勘察仪器有限公司  
后插 2 济南普业机电技术有限公司