

DOI: 10.11779/CJGE201704024

## 关于“挡土墙土压力研究的错误倾向”的讨论

吴 明<sup>1</sup>, 朱勇峰<sup>1</sup>, 赵双庆<sup>1</sup>, 陈炜昀<sup>2</sup>

(1. 长安大学地质工程系, 陕西 西安 710054; 2. 南京工业大学岩土工程研究所, 江苏 南京 210009)

## Discussion on “Error tendency for studying earth pressure on retaining walls”

WU Ming<sup>1</sup>, ZHU Yong-feng<sup>1</sup>, ZHAO Shuang-qing<sup>1</sup>, CHEN Wei-yun<sup>2</sup>

(1. Department of Geological Engineering, Chang'an University, Xi'an 710054, China; 2. Institute of Geotechnical Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 210009, China)

中图分类号: TU432 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2017)04-0767-03

作者简介: 吴 明(1979-), 男, 副教授, 主要从事地裂缝等方面的教学和科研。E-mail: ming\_eagle@163.com。

《岩土工程学报》2016年第7期刊出“挡土墙土压力研究的错误倾向”一文<sup>[1]</sup>(以下简称“原文”), 内容深刻, 言辞犀利, 是一篇彰显严谨治学精神的好文章。笔者拜读完原文后, 对于原文作者的独立之人格, 针砭时弊的精神非常钦佩。这里笔者有以下3点问题, 愿与原文作者进行讨论。

### (1) 对土拱的认识

原文试图以结构力学中拱的三要素来衡量土体中的拱, 这有失偏颇。土力学发展至今之所以能成为一门独立学科, 就是因为土力学基本原理的发现。Terzaghi<sup>[2]</sup>描述土拱效应为: 当土体的一部分屈服时, 屈服土体从原有位置移出, 屈服土体和邻近静止土体的相对移动将受到两部分土体间剪应力的阻碍作用, 由于剪应力阻力有使屈服土体保留原有位置的趋势, 从而使屈服区域的土压力减小, 而邻近静止土体的土压力增大, 这种土压力从屈服区域转移到邻近静止区域的现象称之为土拱效应。土拱效应的实质就是要引起应力迁移。土拱只是研究应力迁移过程中的现象和手段而已。具有适当摩擦特性的材料, 土与结构物相互作用中必然存在此现象。Spangler 等<sup>[3]</sup>在研究沟埋和上埋式管道土压力时已经提到了土拱效应的问题, 如图1所示。Spangler 等<sup>[3]</sup>分别用了类似“正拱”和“反拱”的概念描述沟埋、上埋式管道上覆土压力中的拱效应, 但是仅限于定性的语言描述。从图1沟埋式模式图中可以看出 Spangler 所用的拱是大主应力迹线, 并用结构力学中拱的概念描述埋管中的拱效应现象。

随后 Handy<sup>[4]</sup>引用沟埋管道拱效应现象研究了挡墙土压力问题, 但是与 Spangler 不同他采用了小主应力迹线(即没有用结构力学中拱的概念), 并且在文中解释原因为大主应力迹线在沟埋模式下会不连续。原文也引用了 Terzaghi 关于土拱原理的解释和 Handy 的成果, 但是从其阐述来看, 其对该原理的应用还是不理解, 只是用结构力学的概念来研究土力学问题, 值得商榷。

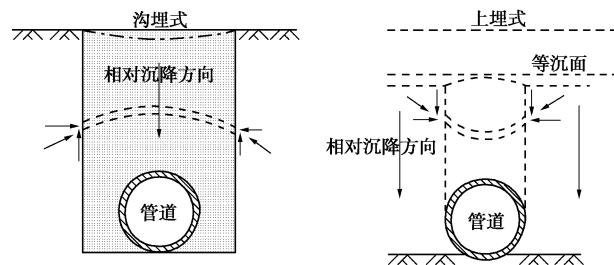


图1 埋管中的拱效应<sup>[3]</sup>

Fig. 1 Arching effect in underground conduits<sup>[3]</sup>

### (2) 侧土压力系数

Handy<sup>[4]</sup>文中之所以引入土拱效应, 并且假设小主应力迹线为圆弧型来量化土拱效应, 就是为了改进侧土压力系数  $k$  (为了对比其他研究领域, 下文均以侧压力系数代替侧土压力系数)。侧压力系数对于土拱法土压力计算非常重要, 同时在埋管土压力和工业筒仓料斗侧压力计算也非常重要的。侧压力系数认识的历程如表1所示。Janssen<sup>[5]</sup>最早在计算谷仓侧压力时认为  $k$  为一个试验常数, 需要通过试验来确定。Marston 等<sup>[6]</sup>在计算埋管上覆土压力时, 认为侧压力系数应为主动土压力系数, 之后 Krynine<sup>[7]</sup>通过土力学理论指出 Marston 等的错误, 并认为  $k$  应更正为表1中相应公式。Handy 在考虑土拱效应后又对  $k$  进行了改进, 之后还有很多领域的人对  $k$  进行定义, 如表1所示, 限于篇幅, 不一一列举了。

表1中:  $\phi$  为内摩擦角,  $\theta$  为主应力偏转角,  $N$  为被动土压力系数,  $k_a$  为主动土压力系数。

笔者之所以列举这么多侧压力系数, 意在说明该系数并不是随便变动, 而是有根据的。另外, 笔者也同意原文作者对于

当前土拱法土压力研究中,任意采用一种拱的形状即提出一种侧压力系数之后得到相应土压力分布的乱象的指正。原文作者针砭时弊的精神让笔者很钦佩。

表 1 侧压力系数

Table 1 Lateral pressure coefficients

提出者	侧压力系数公式	应用领域
Janssen <sup>[5]</sup>	带试验测定参数	谷仓侧压力
Marston 等 <sup>[6]</sup>	$k = k_a = (1 - \sin \phi) / (1 + \sin \phi)$	埋管土压力
Krynine <sup>[7]</sup>	$k = (1 - \sin^2 \phi) / (1 + \sin^2 \phi)$	土力学理论
Handy <sup>[4]</sup>	$k = \frac{(\cos^2 \theta + k_a \cdot \sin^2 \theta)}{(\sin^2 \theta + k_a \cdot \cos^2 \theta)}$	挡墙土压力
Paik 等 <sup>[8]</sup>	$k = \frac{3(N \cdot \cos^2 \theta + \sin^2 \theta)}{3N - (N-1)\cos^2 \theta}$	挡墙土压力
曾广翹 <sup>[9]</sup>	$k = \frac{(1 - \sin \phi \cdot \cos 2\theta)}{(1 + \sin \phi \cdot \cos 2\theta)}$	工业料仓

另外,原文指出的“土拱计算原理第一谬误”,实际上是原文作者对土拱法中侧压力系数的变化规律没有认识清楚。文献[9]用了式(1)所示的侧压力系数,同时给出了 $\theta$ (圆弧拱起点A与水平方向夹角)和 $\delta$ (墙土界面摩擦角)的关系(文献[9]中式(3)),进一步可变化为本文式(2):

$$k = \frac{\sigma_h}{\sigma_v} = \frac{(\cos^2 \theta + k_a \cdot \sin^2 \theta)}{(\sin^2 \theta + k_a \cdot \cos^2 \theta)}, \quad (1)$$

$$\theta = \arctan \frac{(N-1) \pm \sqrt{(N-1)^2 - 4N \cdot \tan^2 \delta}}{2 \tan \delta}。 \quad (2)$$

$k_a < 1$ ,式(1)在 $(0, \pi/2)$ 为单调减函数;式(2)中 $N$ 为被动土压力系数且大于1,不难证明其为减函数。因此,根据式(2),当墙土界面摩擦角 $\delta$ 增大时, $\theta$ 减小,又由式(1)可知侧压力系数 $k$ 此时当然增大。原文作者显然没有认识清楚土拱法中的规律,也没有看懂文献[9]表1中罗列的侧压力系数的变化由来,从而得出了错误的结论。因此,原文中多处关于土拱法侧压力系数规律的描述都是错误的。

### (3) 总土压力系数

原文热衷于用库仑土压力系数来和侧压力系数进行比较,并且想用库仑土压力系数来代替侧压力系数。这也是土力学概念不清楚的表现。侧压力系数是土体中一微元进行分析时,定义的侧向应力和竖向应力的比值;而库仑土压力系数是假定楔体滑动理论后,从块体整体力平衡分析得到的合力的土压力系数,严格说两者不同。土拱法中侧压力系数对于土压力分布非常重要,而土压力分布又影响挡墙合力作用点和弯矩大小。文献[9]得到的合力土压力系数如式(3)所示,式中 $\beta$ 为破裂面与水平方向夹角,其他参数同前;其文中指出土压力合力大小和库仑土压力合力大小相同,然而其他土拱法则不尽同。式(4)是文献[7]中的合力土压力系数,式中 $K_{awn}$ 为考虑土拱效应的土条微元侧土压力系数, $\alpha$ 为郎肯主动状态破裂面夹角。显然式(4)的合力土压力系数与文献[9]及库仑土压力系数不同。为了说明土拱法的合力土压力系数存在不同。本文罗列了多种土拱法合力土压力系数,侧压力系数和库仑土压力系数进行比

较,如表2所示。表2中土体取 $\phi=30^\circ$ , $\delta=\phi/3$ ,填土表面水平,墙背铅直。

$$K = \frac{\sin(\beta - \phi) \cdot \cot \beta}{\cos(\beta - \phi - \delta)}, \quad (3)$$

$$\frac{K_{awn}}{(1 + K_{awn} \cdot \tan \delta \cdot \tan \alpha) \cdot \cos \delta}。 \quad (4)$$

表 2 土压力系数

Table 2 Earth pressure coefficients

提出者	合力系数	侧压力系数	备注
Coulomb	0.3085	无	破裂面为求极值
蒋波等 <sup>[10]</sup>	0.2909		同库仑
Paik 等 <sup>[8]</sup>	0.3065	0.338	郎肯主动破裂面
俞缙等 <sup>[11]</sup>	0.2945		剪力为零确定
王杰等 <sup>[12]</sup>	0.3126	0.340	郎肯主动破裂面
Cai 等 <sup>[13]</sup>	0.2945		同俞缙等 <sup>[11]</sup>
Mohammad 等 <sup>[14]</sup>	0.3342	0.341	郎肯主动破裂面

从表2中可以看出,合力土压力系数各不相同,差异较小,但是侧压力系数 $k$ 相差较大(精力有限,仅罗列3个)。因此,用合力土压力系数代替侧压力数从概念和数值上都不合理。其实这里更应该关注土压力的分布,因为土压力分布导致合力作用点和墙体弯矩不同。

最后,笔者对于原文作者的治学精神非常钦佩。限于笔者水平和精力有限,对于该类研究的认识有一定局限性,希望原文作者不吝赐教。

### 参考文献:

- [1] 孙建生. 挡土墙土压力研究的错误倾向[J]. 岩土工程学报, 2016(7): 1324 - 1329. (SUN Jian-sheng. Error tendency for studying earth pressure on retaining walls[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016(7): 1324 - 1329. (in Chinese))
- [2] TERZAGHI K. Theoretical soil mechanics[M]. New York: Wiley, 1943.
- [3] SPANGLER M G, HANDY R L. "Loads on Underground Conduits", Soil Engineering[M]. 3rd ed. New York: Harper Collins, 1973: 658 - 686.
- [4] HANDY R L. The arch in soil arching[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1985, 111(3): 302 - 318.
- [5] JANSSEN H A. Versuche über getreide druck in silozellen[J]. Zeitschrift des Vereins deutscher Ingenieure, 1895(35): 1045 - 1049.
- [6] MARSTON A, ANDERSON A O. "The theory of loads on pipes in ditches and tests of cement and clay drain tile and sewer pipe[M]. Ames: Iowa State College of Agriculture and Mechanic Arts, 1913: 28 - 39.

- [7] KRYNINE D P. "Discussion of 'Stability and stiffness of cellular offerdams' by Karl Terzaghi" *Trans[J]. Am Soc Civ Eng*, 1945, **110**: 1175 - 1178.
- [8] PAIK K H, SALGADO R. Estimation of active earth pressure against rigid retaining walls considering arching effects[J]. *Géotechnique*, 2003, **53**(7): 643 - 653.
- [9] 曾广翘. 深仓中杨森公式侧压系数的修正[J]. 煤矿设计, 1979(5): 20 - 23. (ZENG Guang-qiao. Modification of Janssen's lateral pressure coefficient in deep silos[J]. *Coal Mine Design*, 1979(5): 20 - 23. (in Chinese))
- [10] 蒋波, 应宏伟, 谢康和. 挡土墙后土体拱效应分析[J]. 浙江大学学报, 2005, **39**(1): 131 - 136. (JIANG Bo, YING Hong-wei, XIE Kang-he. Analysis on soil arching behind retaining wall[J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2005, **39**(1): 131 - 136. (in Chinese))
- [11] 俞缙, 周亦涛, 蔡燕燕, 等. 基于土拱效应的刚性挡墙后主动土压力[J]. 岩土工程学报, 2013, **35**(12): 2306 - 2310. (YU Jin, ZHOU Yi-tao, CAI Yan-yan, et al. Active earth pressure against rigid retaining wall considering soil arching[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2013, **35**(12): 2306 - 2310. (in Chinese))
- [12] 王杰, 夏唐代, 贺鹏飞, 等. 考虑土拱效应的刚性挡墙主动土压力分析[J]. 岩土力学, 2014, **35**(7): 1914 - 1920. (WANG Jie, XIA Tiang-dai, HE Peng-fei. Analysis of active earth pressure on rigid retaining walls considering soil arching[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2014, **35**(7): 1914 - 1920. (in Chinese))
- [13] CAI Y, CHEN Q, ZHOU Y, et al. Estimation of passive earth pressure against rigid retaining wall considering arching effect in cohesive-frictional backfill under translation mode[J]. *International Journal of Geomechanics*, 2016, **8**(1): 1 - 11.
- [14] MOHAMMAD H K, THIRAPONG P, TAKEMURA J. Theoretical analysis of earth pressure against rigid retaining walls under translation mode[J]. *Soils and Foundations*, 2016, **55**(4): 664 - 675.

DOI: 10.11779/CJGE201704025

## 关于“挡土墙土压力研究的错误倾向”的讨论

娄培杰<sup>1, 2</sup>

(1. 安徽理工大学土木建筑学院, 安徽 淮南 232001; 2. 安徽理工大学土木工程博士后科研流动站, 安徽 淮南 232001)

## Discussion on “Error tendency for studying earth pressure on retaining walls”

LOU Pei-jie<sup>1, 2</sup>

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China; 2. Postdoctoral Programme of Civil Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)

中图分类号: TU432

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 4548(2017)04 - 0769 - 03

作者简介: 娄培杰(1981 - ), 男, 博士, 讲师, 主要从事岩石力学、土力学方面的研究工作。E-mail: 470474720@qq.com。

贵刊 2016 年第 7 期刊登了题为“挡土墙土压力研究的错误倾向<sup>[1]</sup>”的文章 (以下称之为“原文”)。在原文中孙建生教授提出了 5 大问题。

本文的目的主要是与孙建生教授提出的 5 大问题进行深入的探讨, 以期对挡土墙计算理论的研究方法和相关概念进行澄清。

## 1 土拱与结构拱的区别

土拱这一概念是由 Terzaghi<sup>[2]</sup>首次提出的“soil arching”概念翻译而来:

以活动门试验为例, 活动门在位移很小时, 上部土体会产生“成拱效应”, 此时的土体产生的如产生拱结构。随着活动门位移的增大, 上述拱结构被破坏, 土体会产生如 Terzaghi 所述的土拱效应 (soil arching effect), 其指的是土体应力从屈服区域转移到非屈服区域。

从土拱的来源来看, 土拱与结构拱如曲梁、悬索等是两者不同的概念, 即土拱并不是说土体形成了类似结构的拱, 其力学原理是: 由于土体的不均匀变形而导致土体颗粒挤压使得主

应力方向发生偏转。

因此, 在第一个问题中需要澄清的是:

(1) 土体成拱结构是确实存在的, 但是这样结构是非常不稳定的, 只在土体位移很小的情况下发生。

(2) 在土拱效应发生时, 土体不会发生形成拱结构, 即原文中的“图 2 示意挡土墙主动状态时的真实拱效应的土拱”是错误的, 土拱效应发生时, 原有的“成拱”结构早已被破坏; 从另一个方面也可理解, 如果土体中存在拱结构, 那么土体与土体会存在明显的分界线, 而这种情况在现实情况中并不存在。

## 2 土拱效应的内涵

土拱效应又称“筒仓效应”, 是指当土体等散体发生不均匀变形时, 散体颗粒物会发生相互挤压, 使得主应力发生旋转的一种现象。

从土拱效应理论的发展历史来看, 原文中提到的文献[3]对土拱效应的定义较为狭小:

(1) 在土拱效应的发展历史上, 侧土压力系数  $K$  的求解方式经历了以下 3 个阶段的发展:

第一阶段, 1919 年—1930 年, Marston<sup>[4]</sup>认为  $K$  应取朗肯主动土压力系数  $K_a$ 。

第二阶段, 1940 年—1960 年, Krynnine<sup>[5]</sup>认为  $K$  应取土体滑移面处的水平应力与竖向应力之比, Terzaghi 对此公式大加赞赏, 也得到了 Ladanyi 等<sup>[6]</sup>的支持。

第三阶段, 1985 年至今, Handy<sup>[7]</sup>认为  $K$  应取滑移面处侧向土压力与水平微分层的平均竖向应力之比, 而平均竖向应力通过小主应力轨迹线应力状态的微元体平衡求得。

从上述  $K$  的求解发展历史来看, 由轨迹线点应力状态微元体的平衡条件求解  $K$  仅仅是土拱效应法的一个思路, 不能代表土拱效应方法的全部。

(2) 土拱效应广义的解释是: 由于土体的不均匀变形而使得土体颗粒挤压, 导致土体原有应力场发生改变的一种的现象。在挡土墙土压力领域, 挡土墙墙后土体从静止状态向主动土压力状态发展时, 墙后土体必然会发生沉降, 上部的土体颗粒挤压到下部的土体颗粒之间, 使得下部的土体颗粒形成挤压的效果, 正是这种原因, 使得土体颗粒的自重能够传递到墙背和邻近的土体上。

土拱效应与结构拱是两种不同的现象, 在挡土墙墙后土体处于主动土压力时, 土体不可能形成原文所述的“拱”, 土体颗粒在主动土压力状态下, 土体的竖向变形较大, 是不可能形成所谓的类似与结构“拱”。

(3) 当墙背光滑时, 原文认为此时仍然具有“土拱效应”, 对于这一认识有待商榷。在墙背光滑的情况下, 墙后土体的条件与“土体的三轴压缩试验”条件是类似的:

光滑的墙背相当于橡胶膜, 自重应力相当于  $\sigma_1$ , 墙后水平土压力相当于  $\sigma_3$  (图 1)。

在这种条件下, 由于墙背光滑, 土体的自重是不可能传递到周边的结构物上, 从而也不可能发生土拱效应。

土拱效应不是一种结构拱, 所谓的拱脚、拱顶不是真实存在的, 从结构上的梁来类比理解土拱效应是不合理, 土拱效应仅仅代表“散体物质在不均匀变形时的一种受力特性”。

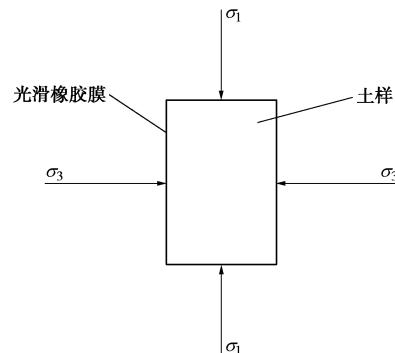


图 1 土的常规三轴压缩试验示意图

Fig. 1 Schematic diagram of conventional three-axis compression tests on soils

## 3 土拱法与力矩法的几个问题的讨论

原文中认为土拱法和力矩法存在 3 个谬论, 总结如下:

第一: 侧土压力系数随着墙壁摩擦角的增大而增大, 而基本常识是: 墙壁摩擦角越大主动土压力系数越小, 与经典土压力理论严重悖逆。

对于第一个问题而言, 经典库仑理论中的主动土压力系数是原文所述的“合力水平土压力系数  $K'$ ”, 其大小为挡土墙水平总压力  $P_x$  与墙后滑动土体总重  $W$  (未考虑地面超载) 之比; 而土拱原理给出的  $K$  值是挡土墙后土体微分分层的水平应力  $\sigma_h$  与竖向平均应力  $\bar{\sigma}_v$  之比, 如下式所示:

$$\left\{ \begin{array}{l} K = \frac{\sigma_h}{\bar{\sigma}_v} \\ K' = \frac{P_x}{W} = \frac{\int_0^H \sigma_h dz}{\frac{1}{2} \gamma H^2} \end{array} \right. \quad (1)$$

由此可知, 两者的表达含义不同, 一个是合力之比, 一个是应力之比, 两者不能视为同一物理概念, 其变化规律不同, 并不能说明其是土拱法的谬误。

式 (2) 为原文给出的考虑土拱效应的墙后水平土压力的表达式, 从中可知:  $K$  是影响挡土墙主动土压力非线性程度的参数: 当墙后摩擦角增大,  $K$  以及  $aK$  均为增大的趋势, 墙后水平土压力的非线性趋势越强。

$$\sigma_h = K \left[ \left( q - \frac{\gamma H}{aK - 2} \right) \left( \frac{H - y}{H} \right)^{aK-1} + \frac{\gamma(H - y)}{aK - 2} \right] \quad (2)$$

式中,  $q$  表示超载,  $\gamma$  表示土体重度,  $H$  表示挡土墙高度,  $a$  为参数,  $K$  为侧土压力系数,  $\sigma_h$  为距墙顶任意高度  $y$  的墙后水平土压力。

第二, 土拱法以合力土压力系数等于库仑土压力系数为依据证明主应力土拱原理计算的合理性。然而不论小主应力轨迹线的何种假设, 只要采用微分层平衡推导都可以证明其方法是合理可靠的。

对于该问题, 从以下几方面来分析:

(1) 合力土压力系数等于库仑土压力系数并不能说明其方法的合理性。

Paik 等<sup>[8]</sup>假定滑裂面为朗肯滑裂面, 其给出的土压力合力公式为

$$P_{ah} = \frac{\gamma H^2}{2} \frac{K}{1 + K \tan \delta \tan \alpha} , \quad (3)$$

式中,  $P_{ah}$  表示水平土压力合力,  $\delta$  表示墙土摩擦角,  $\alpha$  表示朗肯滑裂面倾角。

从式(3)可知, 土拱法得到的“结果合力土压力系数”也是与  $K$  相关的。通过 Tsagareli<sup>[9]</sup> 的 5 个大型室内试验, 表明: Paik 法计算得到的合力较传统的库仑土压力更接近与实际, 即 Paik 法的合力土压力系数比库仑土压力系数更为准确。

同时, 式(3)也能解释第一个悖论:

随着墙土摩擦角的增大,  $K$  的趋势是逐渐增大, 然而  $\frac{K}{1 + K \tan \delta \tan \alpha}$  的趋势是先减小(直到  $\delta/\varphi = 0.7$ ), 后增大。即  $K$  与合力土压力系数的变化规律是不同的。

(2) 土拱效应应用在挡土墙领域, 与经典的土压力理论除了其可以表达挡土墙土压力的非线性之外, 其不同之处还在于: 由于挡土墙墙土摩擦角的影响, 墙体倾覆力矩以及合力作用点高度均大于经典理论的结果。因此, 对于原文中提出的“土拱法得到的合力土压力系数等于库仑土压力系数”的方法, 可以考虑将合力作用点高度作为评价其合理性的指标。

(3) 土拱形状的研究有无必要。土拱形状, 即小主应力轨迹线, 正如原文所述, 要精确的确定它的形状是非常困难的。但是, 土拱法计算中又无法绕开这个问题。

但是, 不同的小主应力轨迹线的假设, 如圆形、抛物线、悬链线, 计算得到的  $K$  值相差不大, 不同之处只是表达式复杂简便与否。因此, 仅仅从土拱曲线上来提出更为精确的挡土墙土压力计算公式意义不大。如原文所述, 这种研究成了一个数学游戏。

第三, 力矩法与土拱法的第一个谬误相同。

力矩法, 与土拱法, 都属于广义上的考虑土拱效应的方法。两者中的  $K$  的意义相同, 均是挡土墙后土体微分分层的水平应力  $\sigma_h$  与竖向平均应力  $\bar{\sigma}_v$  之比; 区别仅仅在于两者的计算思路不同: 力矩法是根据墙后微分层的力矩平衡求得; 土拱法是通过假定主应力轨迹线的形状来求得。

## 4 黏性土下侧向土压力系数求解存在的问题

关于黏性土侧向土压力系数, 在涂兵雄等<sup>[10]</sup>和朱建明等<sup>[11]</sup>的文献中均采用如下的方法:

$$K_{\text{黏}} = K_{\text{paik}} + (K_{\text{paik}} - 1) \frac{\sigma_0}{\bar{\sigma}_v} . \quad (4)$$

式(4)采用坐标平移法研究了黏性土下的侧向土压力系数  $K$  及考虑土拱效应的张拉裂缝高度  $Z_c$ :

$$\left. \begin{aligned} K &= \frac{\sigma_h}{\sigma_v} = \frac{3(\cos^2 \theta + K_a \sin^2 \theta) - 3 \frac{c}{\gamma z \tan \varphi + c}}{3 - (1 - K_a) \cos^2 \theta - 3 \frac{c}{\gamma z \tan \varphi + c}} , \\ Z_c &= \frac{c}{\gamma \tan \varphi} \left( \frac{1}{\cos^2 \theta + \frac{1}{N} \sin^2 \theta} - 1 \right) , \\ \theta &= \frac{\pi}{2} - \frac{1}{2} \left[ \arcsin \left( \frac{\sin \delta}{\sin \varphi} \right) - \delta \right] , \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中,  $\theta$  表示大主应力与水平向夹角, 式事实上存在着很大的问题, 具体如下:

假定墙土摩擦力为  $\tau_w = \sigma_h \tan \delta + c \tan \delta / \tan \varphi$ , 墙后土体应力单元受力模型如图 2 所示。

令  $K=0$  即可得考虑土拱效应的张拉裂缝高度, 这一要求本质上是:

$$K = \frac{\sigma_h}{\sigma_v} = 0 \Rightarrow \sigma_h = 0 . \quad (6)$$

从上可知, 式(6)得到的张拉裂缝高度所对应的土体单元, 其应力莫尔圆对应图 2 中的应力莫尔圆 1, 此时小主应力为负值即土单元在小主应力方向受拉。对于土体而言, 其基本无法承受拉应力。因而按照应力莫尔圆的理解, 小主应力应满足  $\sigma_3 \geq 0$ , 即墙体大于  $Z_{cr} = \frac{2c}{\gamma \sqrt{K_a}}$  才能按照式(5)的侧向土压力

系数方法。与此矛盾的是, 在  $Z_{cr} = \frac{2c}{\gamma \sqrt{K_a}}$  即  $\sigma_3 = 0$  时  $\sigma_h \neq 0$ ,

这便意味着土体立即产生了水平向应力。上述的问题导致了一个非常难以解决的问题:

式(5)的应用范围在哪里? 如果认为土拱效应自式(5)给出的张拉裂缝高度就开始, 那么便会面临这样一个问题: 土体能承受拉应力? 如果认为  $\sigma_3 = 0$  后式(5)才能应用, 那么要面临另外一个问题: 土体侧向应力应该是一个从零不断增大的过程, 不可能在  $Z_{cr}$  处突然从 0 突变为某一值?

根据上述分析, 黏性土考虑土拱效应理论还有较多的瑕疵, 张拉裂缝高度应该处于  $Z_c$  和  $Z_{cr}$  之间, 具体在何处还需要进一步的研究, 采用式(5)得出的结论是保守的。

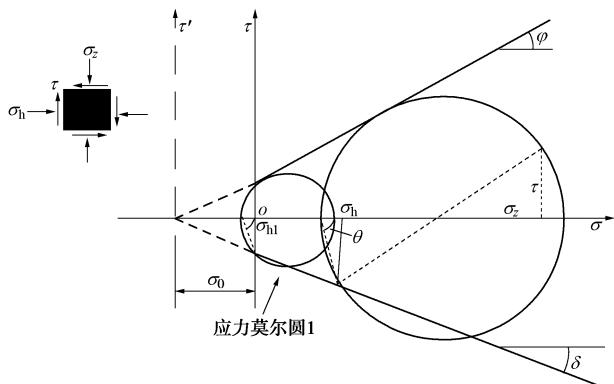


图 2 黏性土填料挡土墙后土体单元莫尔圆

Fig. 2 Mohr's circle of soil element behind retaining wall of clayey backfill

## 5 结论

(1) 土拱效应，其是指土体在不均匀变形下，由于颗粒挤压而引起主应力从屈服区域转移到非屈服区域。具体到挡土墙领域，当挡土墙处于主动土压力状态时，由于挡土墙前移使得墙后土体产生不均匀沉降，墙后滑动土体颗粒挤压，使得滑动土体的自重的一部分转移到挡土墙上。

(2) 侧土压力系数  $K$  与土压力合力土压力系数是两个完全不同的物理量, 前者表示挡土墙后土体微分分层的水平应力  $\sigma_h$  与竖向平均应力  $\bar{\sigma}_v$  之比; 后者为挡土墙水平总压力  $P_x$  与墙后滑动土体总重  $W$  之比。

(3) 黏性土在考虑土拱效应时, 应用类似砂性土的方法, 求解  $K$  时存在着较大的问题。

### 参考文献：

- [1] 孙建生. 挡土墙土压力研究的错误倾向[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(7): 1324 - 1329. (SUN Jian-sheng. Error tendency for studying earth pressure on retaining walls[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(7): 1324 - 1329. (in Chinese))
  - [2] TERZAGHI K. Large retaining wall tests I -pressure of dry sand[J]. Engineering News Record, 1934, 112: 136 - 140.
  - [3] 蒋 波, 应宏伟, 谢康和. 挡土墙后土体拱效应分析[J]. 浙

Jiang Bo, Ying Hong-wei, Xie Kang-he. Analysis on soil arching behind retaining wall[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2005, 39(1): 131 - 136. (in Chinese))

- [4] MARSTON A. The theory of external loads on closed conduits in the light of the latest experiments[C]// Highway Research Board Proceedings. Washington D C, 1930: 138 - 170.
  - [5] KRYNINE D P. Discussion of "Stability and stiffness of cellular cofferdams" by Karl Terzaghi[J]. Transactions, ASCE, 1945, **110**: 1175 - 1178.
  - [6] LADANYI B, HOYAUX B. A study of the trap-door problem in a granular mass[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1969, **6**(1): 1 - 14.
  - [7] HANDY R L. The arch in soil arching[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1985, **111**(3): 302 - 318.
  - [8] PAIK K H, SALGADO R. Estimation of active earth pressure against rigid retaining walls considering arching effects[J]. Géotechnique, 2003, **53**(7): 643 - 653.
  - [9] TSAGARELI Z V. Experimental investigation of the pressure of a loose medium on retaining walls with a vertical back face and horizontal backfill surface[J]. Journal of Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1965, **91**(4): 197 - 200.
  - [10] 涂兵雄, 贾金青. 考虑土拱效应的黏性填土挡土墙主动土压力研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, **31**(5): 1064 - 1070. (TU Bing-xiong, JIA Jin-qing. Research on active earth pressure behind rigid retaining wall from clayey backfill considering soil arching effects[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, **31**(5): 1064 - 1070. (in Chinese))
  - [11] 朱建明, 赵 琦. 考虑土拱效应的挡土墙主动土压力与被动土压力统一解[J]. 岩土力学, 2014, **35**(9): 2501 - 2506. (ZHU Jian-ming, ZHAO Qi. Unified solution to active earth pressure and passive earth pressure on retaining wall considering soil arching effects[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, **35**(9): 2501 - 2506. (in Chinese))