

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2016.02.009

基于土拱效应的挡墙后砂土主动土压力计算分析

周云东^{1,2}, 杨 德^{1,2}

(1. 岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学岩土工程科学研究所, 江苏 南京 210098)

摘要: 为研究土拱效应下挡土墙后砂土的主动土压力, 考虑墙土摩擦角对土体滑裂面倾角的影响, 对圆弧形的小主应力拱进行理论分析, 计算得到不同深度处的土拱微分体水平宽度及小主应力拱形状表达式。根据所得的拱形状, 提出沿小主应力拱轴方向划分微分单元体的拱弧微分单元法, 并将其用于求解挡土墙主动土压力, 得到了挡土墙主动土压力的理论公式。与试验数据及其他理论方法的比较表明该方法所得理论公式与模型试验结果吻合得较好。

关键词: 土拱; 挡土墙; 墙土摩擦角; 小主应力; 圆拱; 拱弧微分单元法; 主动土压力

中图分类号: TU432 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2016)02-0149-06

Calculation and analysis of active earth pressure on retaining walls considering soil arching effects

ZHOU Yundong^{1, 2}, YANG De^{1, 2}

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Geotechnical Research Institute, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In order to study the active earth pressure on retaining walls in response to soil arching effects, considering the effect of wall friction angles on the inclination of sliding planes, theoretical analysis was applied to minor principal stress arches. The horizontal width of soil arch differential elements at different depths was calculated, and the expression for the shape of minor principal stress arches was obtained. According to the arch shape obtained, a differential element method was developed, in which differential elements were divided along the axis of minor principal stress arches. Then, this method was used to compute the active earth pressure on retaining walls, and a theoretical formula was obtained. Comparison of the present results with experimental data and results from other theoretical methods shows that the results from the present theoretical formula agree with those of the model test.

Key words: soil arch; retaining wall; wall friction angle; minor principal stress; circular arch; arch differential element method; active earth pressure

挡土墙上土压力的计算一直是土木、水利、市政工程中的重要课题。经典的朗肯与库伦土压力理论由于计算简单, 概念明确, 在工程实践中得到了广泛应用。然而, 这两大经典理论得到的土压力均为线性分布, Fang 等^[1]、Sherif 等^[2]、周应英等^[3]、岳祖润等^[4]通过大量室内试验证明: 墙背土压力为非线性分布。

土拱效应是自然界中十分常见的一种现象。1943 年, Terzaghi^[5]通过著名的活动门试验证实了土拱效应的存在, 并把它定义为土压力从屈服区域转移到邻近静止区域的现象。Handy^[6]将土拱定义为小主应力的轨迹, 通过对平行墙间小主应力的理论分析得出其形状为悬链线, 并假定挡土墙后滑裂面处小主应力为水平方向, 得到墙后土压力分布。Paik 等^[7]则假定挡土墙后滑裂面的水平倾角 β 为一常数 ($\pi/4 + \varphi/2$, φ 为土体内摩擦角), 将土拱简化为圆弧形, 由水平层微分单元法得到墙后土压力。王元战等^[8-9]假定滑裂面的水

收稿日期: 2015-03-25

作者简介: 周云东(1975—), 男, 江苏姜堰人, 副教授, 主要从事地基处理、监测及土动力学的教学研究。E-mail: ydzhou@hhu.edu.cn

$$L + \int_0^{\frac{\alpha_w - \alpha_s}{A}} \frac{\sin(\alpha_w - AS)}{\tan\beta} dS = \frac{H - d}{\tan\beta} \quad (7)$$

由滑裂面倾角与大主应力面的夹角 $\eta = \frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}$ 可知: 当 $x=L$ 时, $\alpha = \alpha_s = \frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} - \beta$, β, θ_w 可由文献[12]得到。将此边界条件代入式(3)可得

$$A = \frac{\sin\alpha_w - \sin\alpha_s}{L} \quad (8)$$

由式(7)、式(8)得

$$L = \frac{H - d}{\tan\beta + \frac{\cos\alpha_s - \cos\alpha_w}{\sin\alpha_w - \sin\alpha_s}} \quad (9)$$

图2为根据式(5)绘出的 Tsagareli^[14] 试验中 $H=4.0\text{m}$ 挡土墙对应的土拱形状。

3 拱弧微分法求解挡土墙主动土压力

拱弧微分单元分析法的分析计算模型如图3和图4所示。首先通过图4(图3中虚线圆部分的详图)沿 x' 轴(应力 σ_n 的负方向)、 y' 轴方向力的平衡条件得

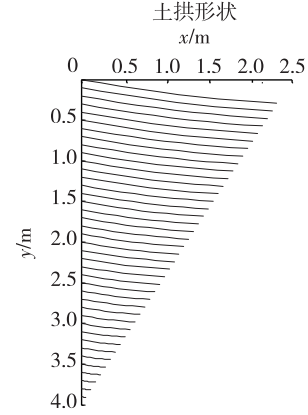


图2 土拱形状

Fig. 2 Soil arch shape

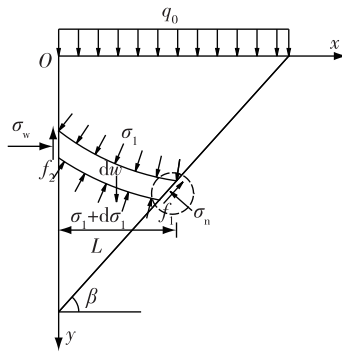


图3 小主应力拱计算模型

Fig. 3 Computational model for minor principal stress arch

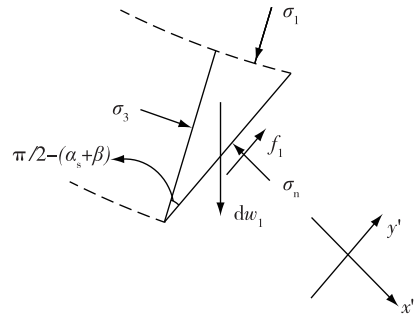


图4 滑裂面处单元受力图(图3中虚线圆详图)

Fig. 4 Forces acting on differential elements on sliding plane (details in circle in Fig. 3)

$$\sigma_1 \cos(\alpha_s + \beta) \frac{d\cos\alpha_w}{\tan(\alpha_s + \beta)} + \sigma_3 d\cos\alpha_w \cos\left(\frac{\pi}{2} - \alpha_s - \beta\right) + dw_1 \cos\beta - \sigma_n \frac{d\cos\alpha_w}{\sin(\alpha_s + \beta)} = 0 \quad (10)$$

$$f_1 \frac{d\cos\alpha_w}{\sin(\alpha_s + \beta)} - \sigma_1 \sin(\alpha_s + \beta) \frac{d\cos\alpha_w}{\tan(\alpha_s + \beta)} + \sigma_3 d\cos\alpha_w \sin\left(\frac{\pi}{2} - \alpha_s - \beta\right) - dw_1 \sin\beta = 0 \quad (11)$$

其中

$$f_1 = \sigma_n \tan\varphi$$

联立式(10)、式(11)得

$$\begin{aligned} & f_1 \frac{d\cos\alpha_w}{\sin(\alpha_s + \beta)} - \sigma_1 \cos(\alpha_s + \beta) \frac{d\cos\alpha_w}{\tan(\alpha_s + \beta)} + \sigma_3 d\cos\alpha_w \cos(\alpha_s + \beta) - \\ & \tan\beta \left[\sigma_n \frac{d\cos\alpha_w}{\sin(\alpha_s + \beta)} - \sigma_1 \cos(\alpha_s + \beta) \frac{d\cos\alpha_w}{\tan(\alpha_s + \beta)} - \sigma_3 d\cos\alpha_w \sin(\alpha_s + \beta) \right] = 0 \end{aligned} \quad (12)$$

将 $\sigma_3 = K_a \sigma_1$ (K_a 为主动土压力系数) 代入式(12), 整理得

$$\sigma_n = K_n \sigma_1$$

其中

$$K_n = \frac{\sin\alpha_s \cos(\alpha_s + \beta) - K_a \cos\alpha_s \sin(\alpha_s + \beta)}{\cos\beta \tan\varphi - \sin\beta} \quad (13)$$

由图4中拱体沿 x, y 方向的静力平衡条件得

$$\sigma_w dy + (\sigma_1 + d\sigma_1) \int_0^{\alpha_w - \alpha_s} \sin\alpha dS - \sigma_1 \int_0^{\alpha_w - \alpha_s} \sin\alpha dS - \sigma_n \sin\beta \frac{dycos\alpha_w}{\sin(\alpha_s + \beta)} + f_1 \cos\beta \frac{dycos\alpha_w}{\sin(\alpha_s + \beta)} = 0 \quad (14)$$

$$f_2 dy + (\sigma_1 + d\sigma_1) \int_0^{\alpha_w - \alpha_s} \cos\alpha dS - \sigma_1 \int_0^{\alpha_w - \alpha_s} \cos\alpha dS + \sigma_n \cos\beta \frac{dycos\alpha_w}{\sin(\alpha_s + \beta)} + f_1 \sin\beta \frac{dycos\alpha_w}{\sin(\alpha_s + \beta)} - dw = 0 \quad (15)$$

其中

$$A_1 = \frac{\sin\alpha_w - \sin\alpha_s}{L} = \frac{A_p}{H-y} \quad A_2 = \frac{A_p}{H-y-dy}$$

$$dw = \rho g dy \cos\alpha_w \frac{\alpha_w - \alpha_s}{A_1} \quad A_p = (\sin\alpha_w - \sin\alpha_s) \tan\beta + \cos\alpha_s - \cos\alpha_w$$

式中: ρ ——土体密度。

联立式(14)、式(15),并代入式(13)得

$$\frac{d\sigma_1}{dy} + \frac{P}{H-y} \sigma_1 = \rho g Q \quad (16)$$

其中

$$P = \frac{K_n A_p \cos\alpha_w}{\sin(\alpha_s + \beta)} \frac{\cos\beta + \tan\varphi \sin\beta + (\sin\beta - \tan\varphi \cos\beta) \tan\delta}{\sin\alpha_w - \sin\alpha_s - (\cos\alpha_s - \cos\alpha_w) \tan\delta} - 1$$

$$Q = \frac{\cos\alpha_w (\alpha_w - \alpha_s)}{\sin\alpha_w - \sin\alpha_s - (\cos\alpha_s - \cos\alpha_w) \tan\delta}$$

式(16)为 σ_1 关于 y 的一阶线性非齐次微分方程,可用分离变量法求解:

$$\sigma_1 = \frac{\rho g Q}{P-1} (H-y) + C(H-y)^P \quad (17)$$

式中: C ——待定常数。

由式(14)、式(16)和式(17)得

$$\sigma_w = \rho g Q \left(\frac{M}{P-1} - \frac{\cos\alpha_s - \cos\alpha_w}{A_p} \right) (H-y) + MC(H-y)^P \quad (18)$$

其中

$$M = K_n \frac{\cos\alpha_w}{\sin(\alpha_s + \beta)} (\sin\beta - \tan\varphi \cos\beta) + \frac{\cos\alpha_s - \cos\alpha_w}{A_p} (P+1)$$

式(18)即为本文推导的挡土墙平移模式下主动土压力强度计算理论公式,其中待定参数 C 可由边界条件确定。当地面无外荷载时,可由 $y=0, \sigma_w=0$ 确定 $C = H^{-P} \left[\frac{\rho g Q H (\cos\alpha_s - \cos\alpha_w)}{A_p M} - \frac{\rho g Q H}{P-1} \right]$ 。

4 实例验证

前苏联学者 Tsagareli^[14]进行了平移模式下的刚性挡土墙试验。该试验挡土墙墙背竖直,填土为海沙,天然密度 $\rho = 1.84 \text{ g/cm}^3$,内摩擦角 $\varphi = 37^\circ$,墙土摩擦角 $\delta = 28^\circ$,挡土墙高度 $H = 2.0 \text{ m}, 2.5 \text{ m}, 3.0 \text{ m}, 3.5 \text{ m}, 4.0 \text{ m}$ 。本文方法与实测值^[14]、王梅等^[13]方法、应宏伟等^[12]方法以及 Paik 等^[7]方法得到的挡土墙主动土压力如图5所示。

从图5可以看出,考虑土拱效应的各种方法均能得出平移模式挡土墙主动土压力是非线性分布的,与试验数据的非线性分布的规律相符。王梅等^[13]方法、应宏伟等^[12]方法以及 Paik 等^[7]方法相比于实测值整体偏小,而且随着挡土墙高度 H 的增加,这种偏差会逐渐增大;而本文方法相比于实测值整体偏大,且随着挡土墙高度 H 的增加,这种偏差会逐渐减小,这是由于墙土摩擦角发挥作用的程度有关系,本文认为墙土摩擦

角不随着土体深度变化,而实际上墙土摩擦角随着深度会逐渐变小,因而导致计算得到结果在土体深度较大处与实测结果偏差较大。与其他方法相比,本文方法与试验数据更为接近,一致性更好。同时也可以得出,应宏伟等^[12]、Paik 等^[7]所采用的水平层分析法与王梅等^[13]的沿简化的小主应力偏转轴划分微分单元及本文的沿小主应力轴划分微分单元的拱弧微分法相比,与试验数据偏差较大。由以上分析可知,本文方法与其他理论方法相比,与试验数据吻合得更好一些。

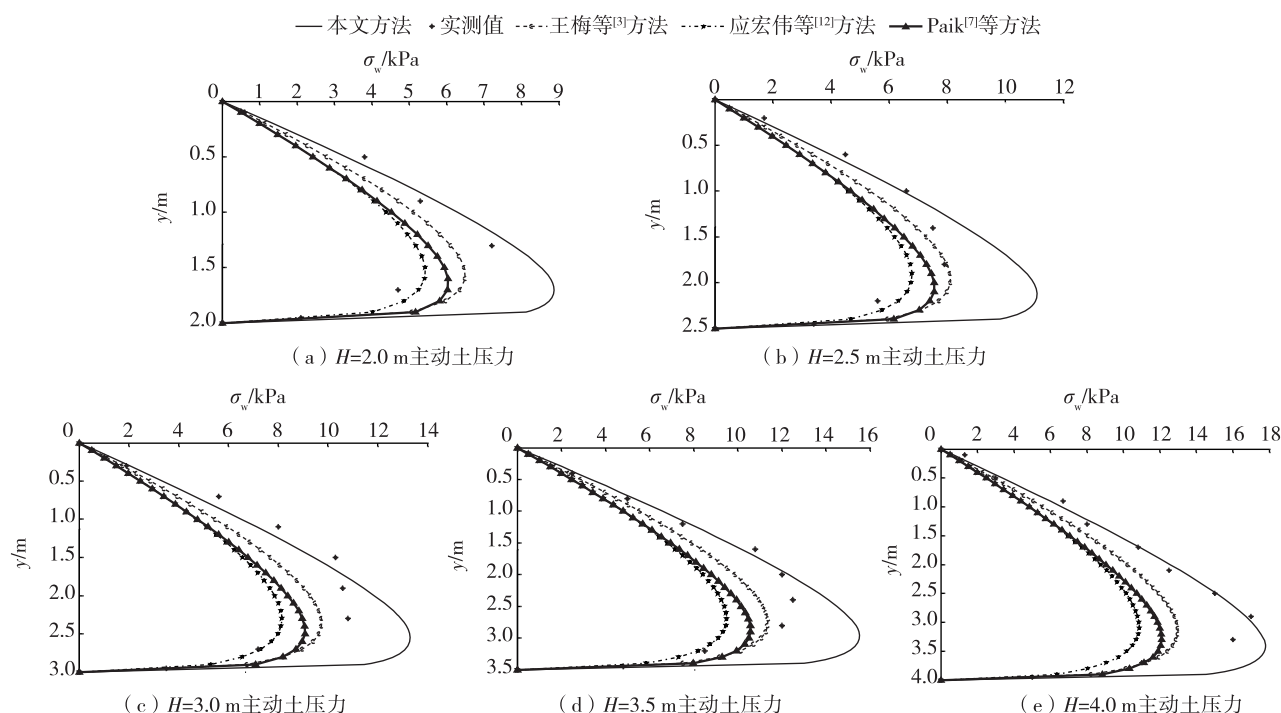


图5 不同方法得到的主动土压力强度分布对比

Fig. 5 Comparison of active earth pressure distributions obtained by different methods

5 结 语

a. 考虑墙土摩擦角对土体滑裂面倾角的影响,假定圆弧形小主应力拱,推导出了土拱形状的表达式,根据土拱形状提出了拱弧微分单元法,并由此求解得到挡土墙的主动土压力的理论计算公式。

b. 根据实际拱形,分析并求解得到了土拱微分体在不同深度处的水平宽度 L ,从而绘出土拱沿不同深度的形状。

c. 通过与实验数据及其他方法对比分析,本文提出的拱弧微分法更接近于试验结果,验证了本文方法在理论上的合理性。

d. 本文的计算过程适用于砂性土,对于黏性土的黏聚力如何考虑还有待进一步的研究。

参考文献:

- [1] FANG Y S, ISHIBASHI I. Static earth pressure with various wall movements[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1986, 112(3): 317-333.
- [2] SHERIF M A, FANG Y S, SHERIF R I. K_A and K_0 behind rotating and non-yielding walls[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1986, 112(3): 317-333.
- [3] 周应英,任美龙. 刚性挡土墙主动土压力的试验研究[J]. 岩土工程学报, 1990, 12(2): 19-26. (ZHOU Yingying, REN Meilong. An experimental study on active earth pressure behind rigid retaining wall[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1990, 12(2): 19-26. (in Chinese))
- [4] 岳祖润,彭胤宗,张师德. 压实黏性填土挡土墙土压力离心模型试验[J]. 岩土工程学报, 1992, 12(6): 90-96. (YUE Zurun, PENG Yinzong, ZHANG Shide. Centrifuge model tests on lateral pressure on walls retaining compacted clayey backfill[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1992, 12(6): 90-96. (in Chinese))

- [5] TERZAGHI K. Theoretical soil mechanics[M]. New York; Wiley, 1943.
- [6] HANDY R L. The arch in soil arching[J]. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1985, 111(3): 302-318.
- [7] PAIK K H, SALGADO R. Estimation of active earth pressure against rigid retaining walls considering arching effect[J]. Geotechnique, 2003, 53(7): 643-653.
- [8] WANG Y Z. Distribution of earth pressure on a retaining wall[J]. Geotechnique, 2000, 50(1): 83-88.
- [9] 王元战, 李新国, 陈楠楠. 挡土墙主动土压力分布与侧压力系数[J]. 岩土力学, 2005, 26(7): 1019-1022. (WANG Yuanzhan, LI Xinguo, CHEN Nannan. Active earth pressure on a retaining wall and lateral coefficient of earth pressure[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(7): 1019-1022. (in Chinese))
- [10] 蒋波. 挡土结构土拱效应及土压力理论研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2005.
- [11] 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(工学版), 2005, 39(1): 131-136. (JIANG Bo, YING Hongwei, XIE Kanghe. Analysis on soil arching behind retaining wall[J]. Journal of Zhejiang University(Engineering Science), 2005, 39(1): 131-136. (in Chinese))
- [12] 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. (YING Hongwei, JIANG Bo, XIE Kanghe. Distribution of active earth pressure against retaining walls considering arching effects[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(5): 717-722. (in Chinese))
- [13] 王梅, 李镜培. 考虑土拱效应的刚性挡土墙主动土压力计算方法[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(5): 865-870. (WANG Mei, LI Jingpei. New method for active earth pressure of rigid retaining walls considering arching effects[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(5): 865-870. (in Chinese))
- [14] 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]. Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1965, 4(4): 197-200.

• 简讯 •

第八届全国河湖治理与水生态文明发展论坛将在南昌市召开

为加强河湖治理技术交流,由中国水利技术信息中心、东方园林股份有限公司主办,江苏省水利学会、清华大学东方生态研究中心、长江科学院等协办,水利部鄱阳湖水资源水生态环境研究中心承办的第八届全国河湖治理与水生态文明建设发展论坛将于2016年4月8—10日在江西省南昌市召开。大会主题:喜迎“十三五”开局,加快推进生态水利建设大发展。征文内容主要包括:(a)最严格的水资源管理制度;(b)水环境治理与水生态修复;(c)滨水景观设计与生态护坡;(d)海绵城市建设与水系规划;(e)PPP模式与加强我国水利现代化建设结合;(f)水利现代化技术(大数据)应用与水利智库建设。

会议电子文件请浏览网站:www.meeting.edu.cn

(本刊编辑部供稿)