

圆弧型墙背下的主动土压力研究

王奎华*, 马少俊

(浙江大学 岩土工程研究所, 杭州 310027)

摘要:基于平面滑裂面假设,采用水平层分析法计算墙背为圆弧型情况下的挡土墙主动土压力及其分布情况,分析了挡土墙与墙后填土的各参数对主动土压力大小及分布的影响。计算结果表明,随着挡土墙倾斜角的减小,土压力分布曲线由凸曲线变成凹曲线。最后通过算例将圆弧型墙背下主动土压力及分布的计算结果与平面墙背下的进行分析对比,结果表明当墙背倾斜角较小,墙土间外摩擦角及填土内摩擦角较大时,采用圆弧型墙背能有效减小主动土力,同时可以提高挡土墙的抗倾覆和抗滑移稳定性。

关键词:挡土墙;圆弧型墙背;水平层分析法;主动土压力
中图分类号:TU432 **文献标志码:**A

1 引言

挡土墙土压力计算和稳定性分析是土力学中的重要课题。1776年,C. A. Coulomb^[1]发表了以挡土墙后滑动楔体整体极限平衡为条件的著名库仑土压力理论。1857年,W. J. M. Rankine^[2]又发表了以微分土体极限平衡为条件的经典朗肯土压力理论。两类经典的土压力理论被广泛地应用在挡土墙设计中。1960年,M. E. Karan^[3]首先采用水平层分析法计算墙面竖直、填土表面水平、填土为砂土的土压力,并得出土压力沿墙高呈非线性分布的结论。此后,国内外学者^[4-13]对挡土墙土压力问题进行了更为深入全面的研究,采用极限平衡、虚功原理、数值分析及模型试验等方法,在挡土墙土压力研究中取得了很多成果。然而,国内外学者在绝大多数挡土墙土压力问题的研究中,往往假定挡土墙墙背为平面,未曾考虑曲面墙背在挡土墙设计中的可行性,挡土墙墙背形状对挡土墙土压力大小及挡土墙稳定性的影响在理论上缺乏深入的分析研究。刘子琪^[14]通过室内模型试验以及实际工程证实了曲线型防浪墙对阻止越浪及提高防浪墙稳定性是十分有效的。鉴于圆弧型防浪墙墙面设计成功,本文对挡土墙墙背为圆弧型时的主动土压力大小及分布情况进行计算分析,并得出了有积极意义的结论,可以为工程中挡土墙设计提供新的设计方法和理论依据。

2 主动土压力计算模型

2.1 基本假定

(1) 研究的问题为平面应变问题,挡土墙及墙后土体纵向延伸很长,几何尺寸与土体性质不发生变化。

(2) 墙后土体为 Coulomb 材料,其强度指标可用其参数黏聚力 c_2 和内摩擦角 φ 表征。

(3) 挡土墙墙背与墙后填土间的粘着力和外摩擦角分别用 c_1 和 δ 表示。

(4) 墙后土体产生主动土压力时,土体形成楔体,其滑裂面为平面并通过墙踵。

(5) 挡土结构刚性且其运动不受限制,运动位移与墙高相比可忽略不计。

2.2 分析模型

假设挡土墙墙高为 H ,填土表面水平,填土重度为 γ ,粘聚力 c_2 ,内摩擦角 φ , c_1 为墙背与填土间的粘着力, δ 为墙背与墙后土体间的外摩擦角。假定挡土墙墙背为圆弧,曲线方程可以表示为 $y=b+\sqrt{a^2+b^2-(x-a)^2}$,其中 (a,b) 为圆心坐标, $b=H/2\sin^2\theta-a/\tan\theta$,取值范围为 $a\geq H/\sin 2\theta$, $b\leq 0$,墙后形成滑动楔体 ABC,滑裂面与水平方向夹角为 α 。建立模型如图 1 所示。

在距滑动楔体表面距离(深度)为 y 处取一厚度为 dy 的水平微分单元体如图 2 所示。假定滑动楔体作为一整体运动,即各水平土层间不产生相对运动,不考虑各薄层间的切向作用力,而作用于微分单元体上的力包括:单元体顶面垂直压力 p_y ,单

收稿日期:2010-05-06;修改稿收到日期:2010-09-20.

基金项目:王奎华*(1965-),男,教授
(E-mail:zdwkh0618@zju.edu.cn)

表 1 主动土压力对比

Tab.1 Comparison of caculated P_a with P'_a

$\theta/^\circ$	$\delta/^\circ$	$\varphi/^\circ$	$P_a/\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$			$P'_a/\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$
			$a=\frac{H}{\sin 2\theta}$	$a=\frac{2H}{\sin 2\theta}$	$a=\frac{5H}{\sin 2\theta}$	
70	10	20	122.77	129.63	134.19	138.33
70	15	30	73.29	88.02	96.73	107.18
70	20	40	35.36	60.31	68.91	83.16
75	10	20	121.39	124.31	125.88	127.00
75	15	30	83.52	88.55	92.25	95.42
75	20	40	51.59	60.92	64.03	71.52
80	10	20	115.85	116.31	116.66	117.11
80	15	30	84.03	84.44	84.56	85.14
80	20	40	56.35	58.35	60.14	61.47

注： P_a 为圆弧型墙背下本文计算所得的主动土压力， P'_a 为直线型墙背下的库仑主动土压力。

参数为 $c_1, c_2, \delta, \varphi, \gamma_s$ ，选择任意滑裂面破裂角 $\alpha (0 < \alpha < \pi/2)$ ，代入求出 P_a 。在所有求得的主动土压力 P_a 中，找出 P_a 的极小值。当 P_a 取到极小值时，所得的滑裂面为墙后土体的真实滑裂面。

假定挡土墙墙高 $H = 5 \text{ m}$ ，填土表面水平，墙后填土为无粘性土，填土重度为 $\gamma_s = 18 \text{ kN/m}^3$ 。将圆弧型墙背下的主动土压力与直线型墙背下的主动土压力进行对比，其他有关参数和计算结果见表 1。

从表 1 可知，圆弧面墙背下计算所得的主动土压力值小于平面墙背下的主动土压力。说明采用圆弧型墙背可以有效减小墙后填土对挡土墙的主动土压力，这对挡土墙的安全性是有利的。当墙背圆心横坐标 a 增大，圆弧半径相应增大，墙背曲线的曲率减小，计算所得的主动土压力值逐渐增大，逐渐接近库仑主动土压力值。可以推测，当 a 值很大时，圆弧型墙背可近似看作直线型墙背，计算所得的土压力值应近似等于库仑主动土压力值。当墙背倾斜角 θ 较小时，采用圆弧型墙背可以有效减小主动土压力值，而当倾斜角较大时，效果并不明显。此外，当墙土间的外摩擦角和填土内摩擦角较大时，采用圆弧型墙背也会显著减小挡土墙的主动土压力值。

主动土压力 P_a 的水平向分力为 P_{ah} ，竖向分力为 P_{av} ，主动土压力 P_a 与水平方向的夹角可以表示为 $\beta = \arctan(P_{av}/P_{ah})$ ， β 值对挡土墙抗倾覆及抗滑移稳定性有很大的影响；随着 β 值增大，挡土墙主动土压力的竖向分力 P_{av} 与水平分力 P_{ah} 之比增大。因为抗倾覆力矩是随着 P_{av} 增大而增大，倾覆力矩随 P_{ah} 的减小而减小。因此当 β 值增大时，抗倾覆力矩增大而倾覆力矩同时减小，这样可以有效地提高挡土墙的抗倾覆能力。由表 2 将圆弧行墙背下

表 2 主动土压力方向角对比

Tab.2 Comparison of caculated β with β'

$\theta/^\circ$	$\delta/^\circ$	$\varphi/^\circ$	$\beta/^\circ$			$\beta'/^\circ$
			$a=\frac{H}{\sin 2\theta}$	$a=\frac{2H}{\sin 2\theta}$	$a=\frac{5H}{\sin 2\theta}$	
70	10	20	37.2	33.7	31.5	30
70	15	30	42.3	39.0	36.7	35
70	20	40	48.3	45.0	42.1	40
75	10	20	30.3	27.6	26.1	25
75	15	30	35.6	32.9	31.2	30
75	20	40	41.2	38.1	36.4	35
80	10	20	23.3	21.6	20.6	20
80	15	30	28.5	26.7	25.7	25
80	20	40	33.8	31.9	30.8	30

注： β 为圆弧型墙背下主动土压力与水平面夹角， β' 为直线型墙背下主动土压力与水平面夹角。

的主动土压力方向角与直线型墙背下的方向角进行对比。

从表 2 可知，圆弧型墙背下的主动土压力方向角 β 比直线型墙背下的方向角 β' 要大；并且圆弧型墙背下的土压力竖向分力大于平面墙背下的土压力竖向分力，而水平方向分力较小。由此可以认为，设计合理的圆弧型墙背在减小挡土墙主动土压力的同时还能提高挡土墙的稳定性的同时还能提高挡土墙的设计有积极的意义。

3.1.2 填土的内摩擦角 φ 对主动土压力的影响

取挡土墙和墙后填土的各参数为 $H = 8 \text{ m}$ ， $\gamma_s = 18 \text{ kN/m}^3$ ， $\theta = 75^\circ$ ， $a = H/\sin 2\theta$ ，通过式(11)得出圆弧型挡土墙下主动土压力值与填土内摩擦角的关系曲线如图 3 所示。从图 3 可以看出，填土内摩擦角 φ 对主动土压力 P_a 的影响非常显著；随着填土的内摩擦角 φ 的增大， P_a 接近线性减小。

3.1.3 墙土间的外摩擦角 δ 对主动土压力的影响

假定挡土墙和墙后填土的各参数为 $H = 8 \text{ m}$ ， $\gamma_s = 18 \text{ kN/m}^3$ ， $\theta = 75^\circ$ ， $a = H/\sin 2\theta$ 。主动土压力值与墙土间外摩擦角的关系曲线如图 4 所示。

从图 4 可以看出，主动土压力 P_a 随墙土间的外摩擦角 δ 的增大而增大；两者的关系曲线变化比较平缓，说明外摩擦角 δ 对 P_a 取值的影响远小于内摩擦角 φ 。

3.1.4 挡土墙倾斜角 θ 对主动土压力分布的影响

取 $H = 5 \text{ m}$ ， $\varphi = 30^\circ$ ， $\delta = 20^\circ$ ， $\gamma_s = 18 \text{ kN/m}^3$ ， $a = H/\sin 2\theta$ 。圆弧型挡土墙墙背下的主动土压力沿墙高的分布曲线如图 5 所示。当挡土墙倾斜角 θ 减小时，墙背逐渐变缓，对应的水平土压力分布曲线由凸曲线逐渐变成了凹曲线，如图 5 所示。

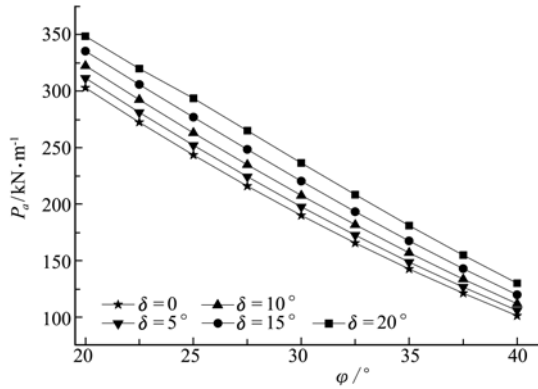


图3 主动土压力 P_a 随 φ 的变化

Fig. 3 Relation curves between P_a and φ

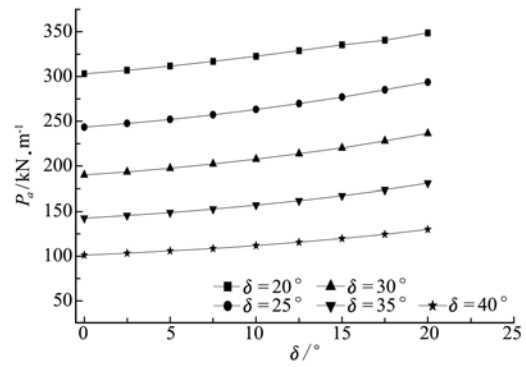


图4 主动土压力 P_a 随 δ 的变化

Fig. 4 Relation curves between active earth pressure and δ

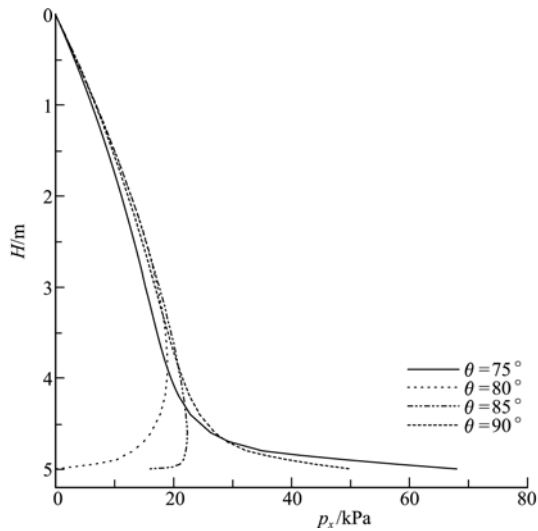


图5 P_{ah} 随 θ 的变化

Fig. 5 Relation curves between P_{ah} and θ

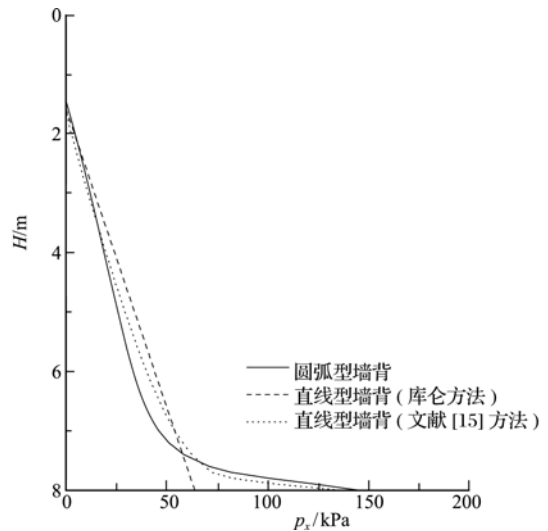


图6 两种墙背情况下水平土压力分布

Fig. 6 Distribution of P_{ah} for two retaining wall backs

文献[15]利用水平层单元分析法计算直线墙背下主动土压力的分布情况,也得出了随着墙背变缓,对应的土压力分布曲线由凸曲线逐渐变成凹曲线,合力作用点也随之降低。

3.2 填土为粘性土

3.2.1 土压力分布

假定挡土墙墙高 $H=8\text{ m}$,墙背倾斜角 $\theta=75^\circ$,填土表面水平,墙后填土重度为 $\gamma_s=18\text{ kN/m}^3$,墙背与填土间的摩擦角和粘着力分别为 $\delta=10^\circ$, $c_1=5\text{ kPa}$,填土的内摩擦角和粘聚力为 $\varphi=20^\circ$, $c_2=10\text{ kPa}$ 。

若挡土墙的位移形式为水平位移和绕墙底转动时,需按填土表面出现裂缝的情况计算土压力,而当挡土墙绕墙顶转动时,则应按不考虑填土表面出现裂缝的情况计算。本文假定挡土墙绕墙底转动,在挡土墙墙背为平面的情况下,开裂深度可计算为

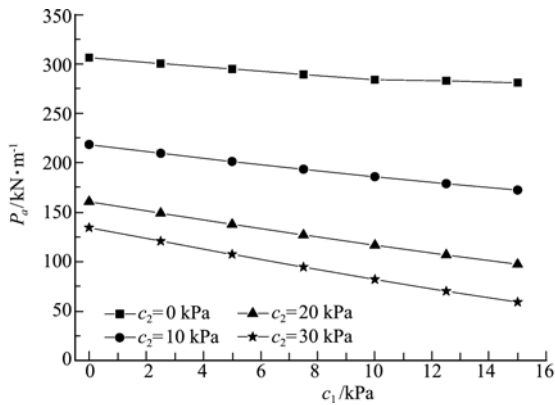
$$Z_0 = \frac{2c_2}{\gamma_s \times \sqrt{K_a}} - \frac{q}{\gamma_s} \quad (12)$$

式中 K_a 为朗肯主动土压力系数, q 为填土表面附加荷载; $K_a = \tan^2(45^\circ - \varphi/2)$, 当 $Z_0 < 0$ 时,取 $Z_0 = 0$,当墙背采用圆弧型曲面 ($a = H/\sin 2\theta$) 时,挡土墙水平向主动土压力的分布曲线如图6所示。

对于本例,在圆弧型墙背情况下,墙土间的开裂深度为 1.45 m ,而采用平面墙背时,按式(12)计算所得的墙土间开裂深度为 1.58 m ,较圆弧型墙背略大。从图6中还可以看出,圆弧型墙背情况下的水平主动土压力亦呈非线性分布,且略小于直线型墙背下的水平土压力。

3.2.2 c_1 和 c_2 对主动土压力的影响

假定挡土墙和墙后填土的各参数为 $H=8\text{ m}$, $\gamma_s=18\text{ kN/m}^3$, $\delta=10^\circ$, $\varphi=20^\circ$, $\theta=80^\circ$, $a = H/\sin 2\theta$ 。主动土压力值与墙土间粘着力及填土粘聚力的关系曲线如图7和图8所示。从图7可以看出,圆弧型墙背的挡土墙主动土压力随着填土与墙背间的粘

图7 主动土压力 P_a 随 c_1 的变化Fig. 7 Relation curves between active earth pressure and c_1

着力 c_1 增大而减小,近似为线性关系;而从图8可以看出,在圆弧型墙背下主动土压力随填土粘聚力 c_2 的增大而显著减小,然而主动土压力减小的幅度随填土粘聚力 c_2 的增大而逐渐减小,且当 c_2 达到一定值之后土压力不再减小。而在平面墙背下,主动土压力是随填土粘聚力的增大呈近似线性减小的,两者规律存在较大的差异。

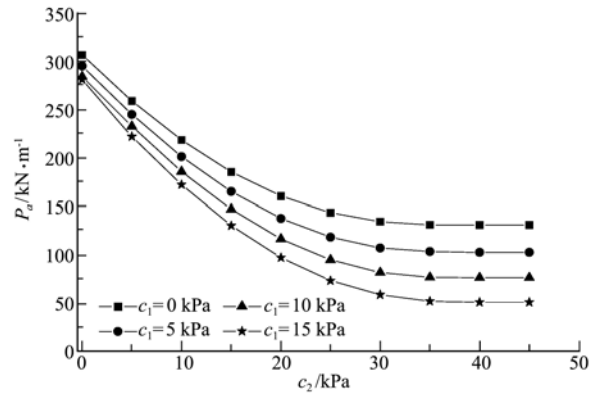
4 结 语

本文采用水平层分析法计算墙背为圆弧型时的主动土压力及水平土压力分布,将计算结果与平面墙背情况下的进行分析对比。最后,分析了挡土墙及墙后填土各参数对圆弧型墙背下主动土压力值及方向角的影响,得出以下结论。

(1) 采用圆弧型墙背可以减小墙后填土对挡土墙的作用力,增加土压力与水平方向的夹角,由此增加挡土墙抗倾覆和抗滑移的能力,提高安全性。当墙土间外摩擦角和填土内摩擦角较大时,效果较为显著。

(2) 对于填土为无粘性土的情况,主动土压力值随填土内摩擦角的增大而显著减小,随墙土间内摩擦角的增大而平缓增大;当挡土墙倾斜角减小时,水平土压力分布曲线也由凸曲线逐渐变成了凹曲线。

(3) 对于填土为粘性土的情况,圆弧型墙背情况下的水平土压力分布呈非线性,主动土压力值随墙土间的粘着力及填土粘聚力的增大而减小。需要指出的是,当填土粘聚力逐渐增大时,主动土压力减小幅度逐渐减小,当填土粘聚力较大时土压力不再减小。

图8 主动土压力 P_a 随 c_2 的变化Fig. 8 Relation curves between active earth pressure and c_2

参考文献 (References):

- [1] Liu Cheng, Evett J B. *Soil and Foundations* [M]. New Jersey: Prentice-Hall, Inc, 1998.
- [2] Rankine W J M. On the stability of loose earth [J]. *Phil Trans Roy Soc, Lond*, 1857, **147**(1): 9-27.
- [3] 顾慰慈. 挡土墙土压力计算 [M]. 北京: 中国建材工业出版社, 2002. (GU Wei-ci. *Calculation of Earth Pressure Acting on Retaining Wall* [M]. Beijing: China Building Materials Industry Press, 2002. (in Chinese))
- [4] Wang Y Z. Distribution of earth pressure on a retaining wall [J]. *Geotechnique*, 2000, **50**(1): 83-88.
- [5] Fang Y S, Chen T J, Wu B F. Passive earth pressure with various wall movements [J]. *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, 1994, **128**(8): 1307-1323.
- [6] Fang Y S, Ishibashi I. Static earth pressure with various wall movements [J]. *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, 1986, **112**(3): 317-333.
- [7] Gray Kellogg C. Vertical earth loads on buried engineered works [J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1993, **119**(3): 487-506.
- [8] Paik K H, Salgado R. Estimation of active earth pressure against rigid retaining wall considering arching effect [J]. *Geotechnique*, 2003, **53**(7): 643-645.
- [9] Chang M F. Lateral earth pressure behind rotating wall [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1997, **34**(2): 498-509.
- [10] Matsuzawa H, Hazarika H. Analysis of active earth pressure against rigid retaining wall [J]. *Soils and Foundation*, 1996, **36**(3): 51-65.
- [11] 胡晓军. 粘性土主动土压力库仑精确解的改进 [J]. 岩土工程学报, 2006, **28**(8): 1049-1052. (HU Xiao-jun. Improvement on Coulumb accurate solution of active

- earth pressure to cohesive soil[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2006, **28**(8):1049-1052. (in Chinese))
- [12] 王元占,王海龙,张文忠. 挡土墙土压力分布[J]. 中国港湾建设, 2000(4):1-5. (WANG Yuan-zhan, WANG Hai-long, ZHANG Wen-zhong. Distribution of earth pressure on retaining wall[J]. *China Harbor Engineering*, 2000(4):1-5. (in Chinese))
- [13] 朱大勇,周早生,钱七虎. 土体主动滑动场及主动土压力的计算[J]. 计算力学学报, 2000, **17**(1):98-104. (ZHU Da-yong, ZHOU Zao-sheng, QIAN Qi-hu. Calculation of active slip field and active earth pressure[J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2000, **17**(1):98-104. (in Chinese))
- [14] 刘子琪,曲淑媛,王振呈. 大连大窑湾一期防波堤工程曲线型防浪墙放浪效果的试验研究[J]. 中国港湾建设, 2005(1):16-30. (LIU Zi-qi, QU Shu-yuan, WANG Zhen-cheng. Experiment and Research on wave protection effect of Curving wave walls on phase I of Dayaowan Breakwater in Dalian[J]. *China Harbor Engineering*, 2005(1):16-30. (in Chinese))
- [15] 李永刚,李俊伟. 挡土墙主动土压力非线性分布[J]. 太原理工大学学报, 2003, **34**(2):196-198. (LI Yong-gang, LI Jun-wei. Non-linear earth pressure behind retaining walls[J]. *Journal of Taiyuan University of Technology*, 2003, **34**(2):196-198. (in Chinese))

Study on active earth pressure of circular arc wall back

WANG Kui-hua*, MA Shao-jun

(Institute of Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Based on sliding plane hypothesis, magnitudes and distribution of active earth pressure under arc wall back are calculated using horizontal layer analysis method. The parametric study shows that the distribution curve of active earth pressure turns from convex curve to concave curve with the decrease in wall inclination angle. The results of arc wall back are compared with that of plan wall back for calculating magnitudes and distribution of active force. It is shown that using arc wall back can greatly reduce the value of active earth pressure and improve the stability of retaining wall against overturning and sliding for the tilt angle of wall back in a low value, the soil-wall friction angle and the internal friction angle of soil in a high value.

Key words: retaining wall; arc wall back; horizontal layer analysis method; active earth pressure