DOI：10.16285/j.rsm.2017.08.004

基于曲线滑裂面的挡墙主动土压力分析

杨 贵[1,2]，王阳阳[1,2]，刘彦辰[1,2]

（1. 河海大学 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 安全与防灾工程研究所，江苏 南京 210098）

摘 要：土体滑裂面形状对挡土墙主动土压力有重要影响。以无黏性填土挡墙为研究对象，假设在考虑土拱效应时，极限状态下墙后土体的滑裂面为曲线，基于水平微分单元法推导出平动模式下挡土墙主动土压力的分布。首先将计算与模型试验结果及已有理论研究成果进行对比分析，验证了方法的可靠性；其次，研究土体内摩擦角和墙-土摩擦角对主动土压力分布、合力大小和作用点高度的影响。结果表明：基于曲线滑裂面假设得到的滑动楔体范围略大于采用直线滑裂面的假设；对于不同高度的挡土墙，建议的计算结果与模型试验结果更为符合；对于不同的土体内摩擦角和墙-土摩擦角，土压力的分布形式和合力作用点与 Paik 解较为接近，但合力略大于 Paik 解。

关 键 词：曲线滑裂面；挡土墙；土拱效应；主动土压力

中图分类号：TU 473.1 **文献标识码**：A **文章编号**：1000－7598 (2017)08－2182－07

Analysis of active earth pressure on retaining walls based on curved sliding surface

YANG Gui[1,2], WANG Yang-yang[1,2], LIU Yan-chen[1,2]

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China;
2. Institute of Engineering Safety and Disaster Prevention, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China)

Abstract: The shape of sliding surface has important influence on the active earth pressure of retaining wall. A new active earth pressure formulation is proposed based on horizontal differential element method assuming retaining wall backfilled with cohesionless soils is under horizontal translation model. The assumption of formulation is that the sliding surface is curved when backfill behind a retaining wall reaches limit equilibrium and that the soil arching is considered. First, the reliability of the formulation is verified based on the compared calculation results of the formulation, model test and classical theory. Second, the influences of the different internal frictional angles of soil and wall-soil friction angles on the distribution, resultant and loading position of active earth pressure are analyzed. The results show the regions of sliding wedge obtained from curved sliding surface assumption are slightly bigger than the regions of plane assumption. The results by the proposed formulation are more consistent with model test results for retaining walls of different heights. The distribution form and loading position of active earth pressure are close to Paik's solutions in different inner friction angles and friction angles on the soil-wall interface. However, the magnitudes of active earth pressure are greater than Paik's solutions slightly.

Keywords: curved sliding surface; retaining wall; soil arching effect; active earth pressure

1 引 言

土压力的准确计算在岩土工程结构设计，尤其是挡土墙的设计中起到重要作用。库仑理论具有计算简单、受力明确的特点，因此，在挡土墙设计时得到广泛应用。该理论在分析过程中假设土压力沿高度呈线性分布，且破坏面为平面；而很多现场和模型试验都证明墙后土压力的分布呈非线性[1−3]。麦远俭[4]、魏元友[5]在试验中观测到墙-土之间摩擦会导致挡土墙背后土压力分布呈非线性；Paik 等[6]认为，土拱是产生非线性的原因，而拱效应产生的根本原因是墙与土之间的摩擦，假设小主应力拱为圆弧，并将滑裂面假设为与水平面呈 $\pi/4+\varphi/2$ 的平面，基于水平微分单元法得到了主动土压力的分布；

收稿日期：2015-09-21
基金项目：国家自然科学基金（No. 51479059）；中央高校基本科研业务费专项资金（No.2013B31914）。
This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (51479059) and the Fundamental Research Funds for the Central Universities (2013B31914).
第一作者简介：杨贵，男，1977 年生，博士，副教授，主要从事土石坝抗震及抗震措施方面的研究工作。E-mail: ygheitu@163.com
通讯作者：刘彦辰，男，1988 年生，博士，主要从事土石坝静动力分析和土压力计算研究。E-mail: ycliuivip@163.com

应宏伟等[7]假定土拱为圆弧，滑裂面为平面，考虑了墙-土摩擦角对挡土墙后土体滑裂面倾角的影响；李永刚[8]、Shubhra[9]、彭述权[10]、王梅[11]、王杰[12]等分别假定土拱形状为悬链线、抛物线、直线等不同形状，考虑土拱效应对墙后土压力的影响；刘忠玉等[13]认为，相邻土层有相互运动的趋势，建立了考虑土层间剪应力的计算方法。

滑裂面形状对墙背土压力的计算有一定的影响。Tsagareli[14]通过大量不同位移模式和挡墙高度的试验，得到极限状态下土体的滑裂面为曲面，并且土体的滑裂面形状几乎不受位移模式的影响；随后，Ellis[15]采用旋轮线滑裂面假设计算了沟堑的安全度；曹振民[16]也采用旋轮线假设求解了斜挡土墙在砂性和黏性填土情况下的土压力的分布形式。由于上述学者在分析过程中没有考虑土拱效应，因而不能真实地反映土体的应力分布。

基于此，本文在前人研究的基础上，考虑土拱效应，并假设滑裂面符合旋轮线分布，研究平动模式下作用在挡土墙上的主动土压力，然后与模型试验数据及其他土压力理论结果进行对比分析，最后对其影响因素进行分析。

2　挡土墙后土体滑裂面

按照 Ellis[15]的假设，当挡土墙背离填土方向移动达到极限平衡状态时，滑裂面为通过墙趾的旋轮线。对于挡土墙墙背直立，墙后填土水平的工况如图 1 所示。H 为挡土墙高度，δ 为墙-土摩擦角，φ 为墙后土体的内摩擦角，E 为主动土压力的合力，W 为滑动体 OAB 所受重力，F 为作用在破坏面 $\overset{\frown}{OA}$ 上反力的合力，假设其方向与 OA 连线的夹角为 φ，θ' 为 OA 与水平面的夹角，称之为滑裂面倾角 θ，θ 为旋轮转动角度，当旋轮线通过墙趾时，设旋轮转动角度为 θ_a。

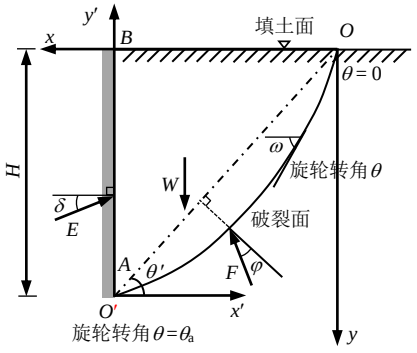


图 1　挡土墙后土体滑裂面

Fig.1　Slip surface behind retaining wall

在图 1 所示的挡土墙坐标中，设墙后填土通过墙趾产生的旋轮线破裂方程为

$$\left.\begin{aligned} x &= R(\theta-\sin\theta)\\ y &= R(1-\cos\theta)\end{aligned}\right\} \tag{1}$$

当 $\theta=\theta_a$ 时，$y=H$，由此可得旋轮半径 $R=H/(1-\cos\theta_a)$。设旋轮线上某点的斜率为 $\tan\omega$，则 $\tan\omega=\mathrm{d}y/\mathrm{d}x=\tan(\pi/2-\theta/2)$，所以 $\omega=\pi/2-\theta/2$。

根据静力平衡条件，W、F、E 应相交于一点，结合正弦定理可得

$$E=\frac{W\sin(\theta'-\varphi)}{\cos(\varphi+\delta-\theta')} \tag{2}$$

其中

$$\theta'=\arctan\frac{1-\cos\theta_a}{\theta_a-\sin\theta_a} \tag{3}$$

由图 1 可知，滑动体 OAB 的重力 W 为

$$W=\gamma S_{OAB}=\gamma\int_0^{\theta_a}R^2(1-\cos\theta)^2\mathrm{d}\theta \tag{4}$$

将 W 代入式（2），可得

$$E=\gamma H^2\frac{\left(\frac{3}{2}\theta_a-2\sin\theta_a+\frac{1}{4}\sin2\theta_a\right)\sin(\theta'-\varphi)}{(1-\cos\theta_a)^2\cos(\varphi+\delta-\theta')} \tag{5}$$

由式（5）可知，若 γ、δ、φ 确定，E 的大小仅取决于 θ_a。令

$$\frac{\mathrm{d}E}{\mathrm{d}\theta_a}=0 \tag{6}$$

可解出 θ_a。

图 2 给出了当 $\varphi=40°$ 时，不同墙-土摩擦角 δ（$\delta=0°$、20°、40°）对滑裂面形状的影响。可以看出，采用式（6）计算得到的曲线滑动楔体的范围要大于 Paik[6]和 Coulomb[17]等采用直线滑裂面假设得到的结果。这是因为 Paik 没有考虑滑裂面随着 δ 的变化，只有当 $\delta=0°$ 时，Paik 计算得到的结果与 Coulomb 一样，当 $0°<\delta\leqslant\varphi$ 时，Paik 滑裂面倾角大于 Coulomb 的结果。

3　挡土墙后土体应力分析

3.1　小主应力拱

应宏伟等[18]对小主应力轨迹线进行了理论分析，证明了土拱形状为悬链线的一部分，同时也通过算例分析得到，悬链线拱和圆弧拱假设得到的土

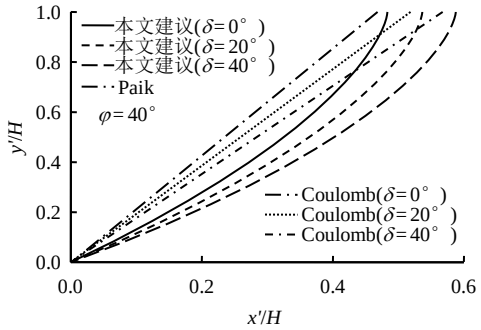


图 2 不同δ时滑裂面的形状

Fig.2 Changes of slip surface with δ

压力极为接近，在实际工程中，可采用相对简单的圆弧形拱。本文采用圆弧形拱描述小主应力轨迹线。

挡墙后土体达到极限平衡状态形成的土拱如图 3 所示。$\sigma_{ah}(\sigma_{ahw})$、$\tau(\tau_w)$、$\sigma_1$和$\sigma_3$分别为土体所受的水平方向应力、剪应力、大主应力和小主应力，α为应力偏转角，即大主应力与水平线的夹角，d_y为微分单元厚度。对轨迹线上任意点E进行应力分析，可得微分单元上的水平方向应力为

$$\sigma_{ah}=\sigma_1\cos^2\alpha+\sigma_3\sin^2\alpha \tag{7}$$

式中：α为圆弧任意一点中心线与水平线的夹角。令$N=\sigma_1/\sigma_3=(1+\sin\varphi)/(1-\sin\varphi)$，将式（7）除以$\sigma_1$可得

$$\frac{\sigma_{ah}}{\sigma_1}=\cos^2\alpha+\frac{1}{N}\sin^2\alpha \tag{8}$$

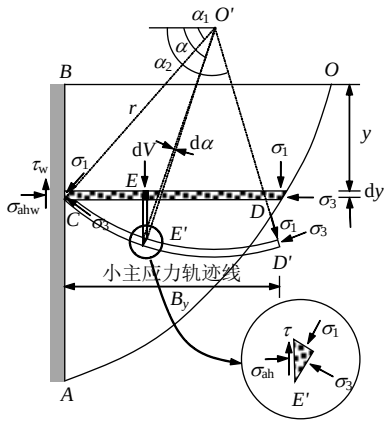


图 3 挡墙后小主应力轨迹线

Fig.3 Trajectory of minor principal stresses behind retaining wall

当$\alpha=\alpha_1$时，$\dfrac{\sigma_{ahw}}{\sigma_1}=\cos^2\alpha_1+\dfrac{1}{N}\sin^2\alpha_1$。

同理可以得微分单元上的竖直方向应力：

$$\frac{\sigma_v}{\sigma_1}=\sin^2\alpha+\frac{1}{N}\cos^2\alpha \tag{9}$$

根据式（8）、（9）可以求得沿着微分单元上任意一点的竖向应力和水平应力。

3.2 侧向土压力系数

由图 3 可知，小主应力轨迹线上任意一点E所受到的竖向力 dV 为

$$\mathrm{d}V=\sigma_v\mathrm{d}A=\sigma_1\left(\sin^2\alpha+\frac{1}{N}\cos^2\alpha\right)r\sin\alpha\mathrm{d}\alpha \tag{10}$$

式中：r 为深度 y 处的最小主应力拱半径，可用该深度处土体宽度B_y表示为

$$r=\frac{B_y}{\cos\alpha_1-\cos\alpha_2} \tag{11}$$

式中：α_1为圆弧与墙背交点C处的小主应力旋转角度，根据应力摩尔圆可以得到

$$\alpha_1=\tan^{-1}\left[\frac{(N-1)\pm\sqrt{(N-1)^2-4N\tan^2\delta}}{2\tan\delta}\right] \tag{12}$$

当$\varphi>\delta$时，α_1有两个解，较大值即为所求；当$\varphi=\delta$时，α_1有惟一解。α_2为圆弧与墙背交点D处的小主应力旋转角度，由图 3 可以看出，α_2等于点D中心线与滑裂面夹角和滑裂面与水平向夹角之和。而点D中心线与滑裂面夹角也就是大主应力线（小主应力面）与破坏面的夹角为$\pi/4-\varphi/2$，滑裂面与水平向的夹角为ω。

$$\alpha_2=\frac{\pi}{4}-\frac{\varphi}{2}+\omega \tag{13}$$

由式（9）～（12）可得到，深度y处微分单元的平均竖向应力为

$$\bar{\sigma}_v=\frac{V}{B_y}=\frac{1}{B_y}\int_{\alpha_1}^{\alpha_2}\mathrm{d}V=\sigma_1\left[1-\frac{N-1}{3N}(\cos\alpha_1+\cos\alpha_2+\cos\alpha_1\cos\alpha_2)\right] \tag{14}$$

进而可得到侧向主动土压力系数为

$$K_{awn}=\frac{\sigma_{ahw}}{\bar{\sigma}_v}=\frac{3(N\cos^2\alpha_1+\sin^2\alpha_1)}{3N-(N-1)(\cos^2\alpha_1+\cos^2\alpha_2+\cos\alpha_1\cos\alpha_2)} \tag{15}$$

3.3 主动土压力

取挡墙后深度 y 处厚度为 dy 的微分单元为分析对象，其受力如图 4 所示。H为挡土墙高度，$\bar{\sigma}_v$

为作用在微分单元顶面的平均竖向应力，$\bar{\sigma}_v + d\bar{\sigma}_v$ 为作用在底面的平均竖向应力，σ_{ahw} 和 τ_w 分别为墙背处微分单元受到的法向应力和剪应力，σ_n 和 τ_n 分别为滑裂面处微分单元受到的法向应力和剪应力，d_y 为微分单元厚度，dW 为微分单元重力，容易得到

$$\left.\begin{aligned}\tau_w &= \sigma_{ahw}\tan\delta\\ \tau_n &= \sigma_n\tan\varphi\end{aligned}\right\} \tag{16}$$

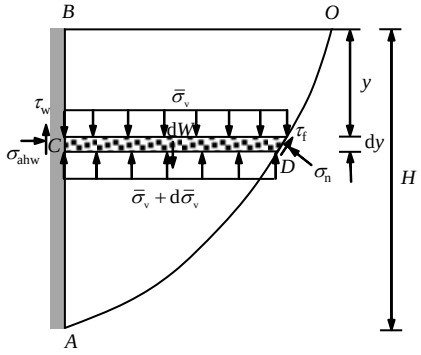


图 4　微分单元受力图

Fig.4　Free body diagram of differential flat element

根据微分单元体竖向平衡条件可得

$$\frac{d\bar{\sigma}_v}{dy} + \frac{\sigma_n - \bar{\sigma}_v}{\tan\omega B_y} + \frac{\tau_w + \tau_f}{B_y} = \gamma \tag{17}$$

式中：γ 为填土的重度。

由微分单元体水平向平衡条件可得

$$\sigma_{awh} + \frac{\tau_f}{\tan\omega} = \sigma_n \tag{18}$$

联立式（17）和（18）可得到求解挡土墙主动土压力的基本方程为

$$\frac{d\bar{\sigma}_v}{dy} + \frac{K_{awn}}{B_y}\left[\frac{1+\tan\omega\tan\varphi}{\tan\omega-\tan\varphi} + \tan\delta - \frac{1}{K_{awn}\tan\omega}\right]\bar{\sigma}_v = \gamma \tag{19}$$

由图 4 可知，对于填土表面的微分单元是不存在竖向应力的，即当 $y=0$ 时，$\bar{\sigma}_v=0$，由此可得到 $\bar{\sigma}_v$，然后可以根据 $\bar{\sigma}_v$ 计算得到合力大小 P_{ah} 和合力作用点高度 h'。

4　实例验证

4.1　实例 1

Fang 等[19]进行了平移模式下水平填土的刚性挡土墙主动土压力试验。该挡墙垂直，墙高 $H=1$ m，墙后填筑砂土（重度 $\gamma=17.65$ kN/m^3。内摩擦角 $\varphi=34°$，墙–土摩擦角 $\delta=17°$）。为验证本文方法的有效性，分别将本文方法与 Coulomb 解、Paik 解和试验结果进行比较。得出的主动土压力分布如图 5 所示。

可以看出，采用本文计算方法和 Paik 解都可以反映土压力沿挡墙非线性分布的规律，而 Coulomb 公式得出土压力为线性分布，并且计算值偏小；相比 Paik 解，本文方法在挡墙中下部的土压力较大，与试验实测值更加符合，说明本文方法较为合理。

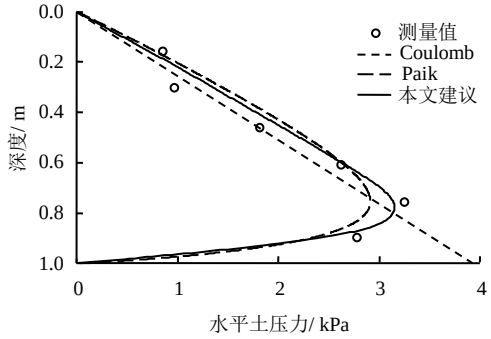


图 5　主动土压力分布对比

Fig.5　Comparison of active earth pressures by different methods

4.2　实例 2

为了验证本文提出的方法对不同高度挡土墙平动模式下土压力计算的适用性，采用 Tsagareli[14]的挡土墙试验进行多种分析方法的比较。Tsagareli 进行了不同高度刚性挡墙（$H=2.0$、2.5、3.0、3.5、4.0 m）的主动土压力分布模型试验，试验参数为 $\gamma=17.65$ kN/m^3，$\delta=\varphi=37°$。图 6 给出了在不同情况下 Coulomb 解、Paik 解、本文解和模型试验的对比结果，从整体上看，Paik 解小于实测数据，而本文得到的规律与 Paik 相同，但整体比 Paik 解略大，与实测结果更为接近。这主要是由于在相同土体参数的情况下，采用曲线滑裂面假设得到的滑动楔体的范围要大于直线滑裂面的假设，滑动的土体会产生更大的推力，提高了土压力理论计算的准确性，更加符合实测数据。

5　参数敏感性分析

5.1　内摩擦角

考虑墙–土摩擦角全部发挥，即保持墙–土摩擦角等于土体内摩擦角（$\delta=\varphi$）。当土体重度 $\gamma=17.65$ kN/m^3，高度 $H=4$ m，分析当 $\varphi=0°$～$40°$ 时，内摩擦角对主动土压力分布、合力及合力作用点的影响，如图 7 所示。

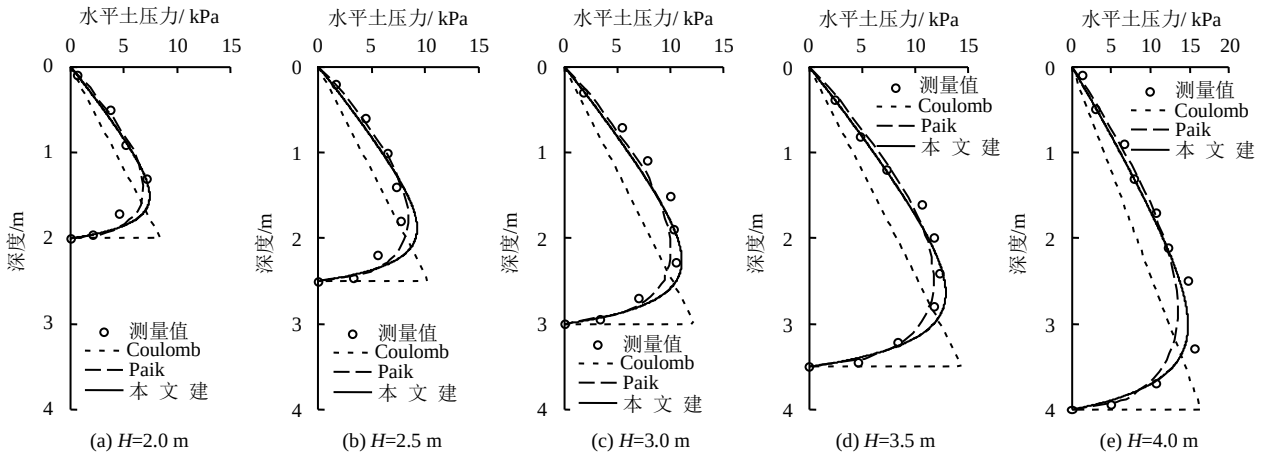


图 6 本文建议值与试验数据对比

Fig.6 Comparisons of predicted and measured values

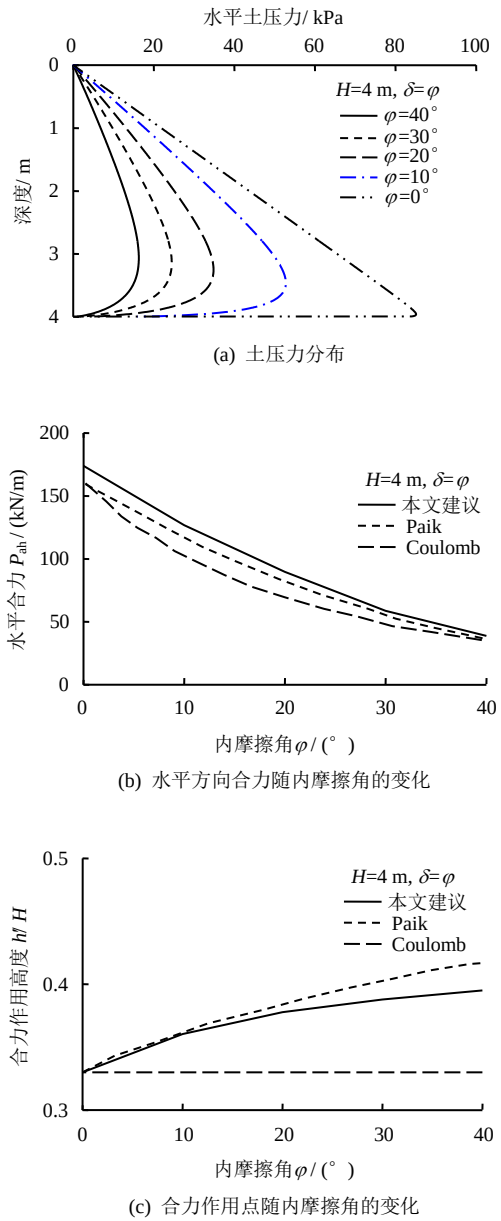


图 7 内摩擦角对主动土压力的影响

Fig.7 Effects of φ on distribution of active earth pressure

由图 7(a)可以看出，随着内摩擦角从 0° 开始增大，土压力由三角形分布逐渐变为曲线分布，并且数值逐渐减少，当 $\varphi=0°$ 时，挡土墙主动土压力分布形状基本相同，呈现出一个近似重心偏下的抛物线形，与 Paik 得到的趋势基本一致。

由图 7(b)可以看到，本文得到的水平土压力合力与 Coulomb 解和 Paik 解规律相同，皆随着摩擦角的增大而降低，但由于本文采用的滑动楔体的范围略大，导致本文计算得到的合力大于其他两种方法的结果[20–21]。

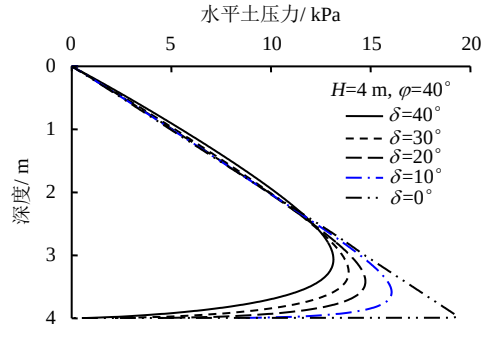
从图 7(c)可以看到，当 $\varphi<10°$ 时，合力作用高度与 Paik 解比较接近，当 $\varphi\geqslant10°$ 时，略小于 Paik 解。

5.2 墙土摩擦角

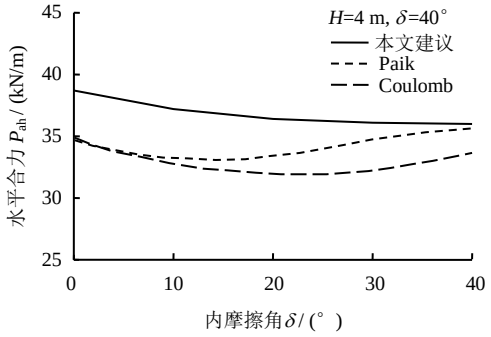
保持填土内摩擦角（$\varphi=40°$）、土体重度（$\gamma=17.65$ kN/m^3）、高度（$H=4$ m）不变，分析当 $\delta\leqslant\varphi$，即 $\delta=0°$ ～40° 时，墙–土摩擦角对主动土压力分布、合力大小及合力作用点的影响，如图 8 所示。

由图 8(a)可以看出，当 $\delta=0°$ 时，墙后主动土压力近似呈三角形分布，当 $\delta>0°$ 时，随着墙–土摩擦角开始增大，土压力由三角形分布逐渐变为曲线分布，靠近墙顶部的土压力分布基本不变，而接近底部的土压力减小，但最大土压力作用点会升高，导致土压力的合力作用点的位置略有提高，从图 8(c)也可以得到相同的结论。

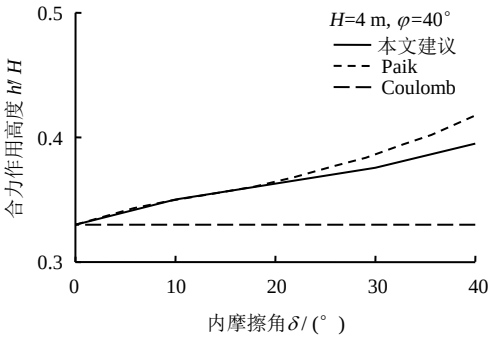
由图 8(b)可以看到，本文得到的水平土压力合力随着 δ 的增大而减小，并略大于 Coulomb 解和 Paik 解。



(a) 土压力分布



(b) 水平方向合力随内摩擦角的变化



(c) 合力作用点随内摩擦角的变化

图 8　墙土摩擦角对主动土压力分布的影响

Fig.8　Effect of δ on distribution of active earth pressure

6　结　论

（1）本文采用滑裂面为通过墙趾的曲面，计算过程中考虑墙-土摩擦角的影响，计算得到的滑动楔体范围比 Paik、Coulomb 等采用滑裂面为平面假设情况下大。

（2）建立了侧向土压力系数和主动土压力的计算方法，通过与已有的模型试验结果对比，证明了计算方法的合理性，可为工程设计提供参考。

（3）随着内摩擦角的增大，墙后土压力分布由三角形逐渐变为曲线，土压力合力逐渐减小，本文方法计算值略大于 Paik 解和 Coulomb 解。

（4）随着墙-土摩擦角的增大，墙后土压力分布也由三角形逐渐变为曲线，土压力合力作用点位置逐渐升高，土压力合力逐渐减小，本文方法计算值略大于 Paik 解和 Coulomb 解。

参 考 文 献

[1] 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 Ying-ying, REN Mei-long. An experimental study on active earth pressure behind rigid retaining wall[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1990, 12(2): 19－26.

[2] 顾慰慈, 武全社, 陈卫平. 挡土墙墙背填土中滑裂体形状的试验研究[J]. 岩土工程学报, 1988, 10(2): 49－56.
GU Wei-ci, WU Quan-she, CHEN Wei-ping. Testing study on the shape of the slip body in the backfilled soil behind the retaining wall[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1988, 10(2): 49－56.

[3] 陈页开, 汪益敏, 徐日庆, 等. 刚性挡土墙主动土压力数值分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(6): 989－995.
CHEN Ye-kai, WANG Yi-min, XU Ri-qing, et al. Numerical analysis of active earth pressure on rigid retaining wall[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(6): 989－995.

[4] 麦远俭. 扶壁结构土压力的计算[J]. 岩土工程学报, 1982, 4(1): 24－33.
MAI Yuan-jian. On the calculating of earth pressure acting on counterfort structure[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1982, 4(1): 24－33.

[5] 魏元友. 扶壁式及 L 式挡土墙的模型土压力试验[J]. 岩土力学, 1994, 15(1): 20－27.
WEI Yuan-you. Research on calculating methods of soil pressures on counterfort walls and L-shaped walls[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 1994, 15(1): 20－27.

[6] PAIK K H, SALGADO R. Estimation of active earth pressure against rigid walls considering arching effects[J]. **Géotechnique**, 2003, 53(7): 643－645.

[7] 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 Hong-wei, JIANG Bo, XIE Kang-he. Distribution of active earth pressure against retaining walls considering arching effects[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2007, 29(5): 717－722.

[8] 李永刚, 白鸿莉. 垂直墙背挡土墙土压力分布研究[J].

水利学报, 2003, 34(2): 102－106.
LI Yong-gang, BAI Hong-li. Study of earth pressure distribution on the retaining wall with vertical back[J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 2003, 34(2): 102－106.

[9] SHUBHRA G, PATRA N R. Effect of arching on active earth pressure for rigid retaining walls considering translation mode[J]. **International Journal of Geomechanics**, 2008, 8(2): 123－133.

[10] 彭述权, 周健, 樊玲, 等. 考虑土拱效应刚性挡墙土压力研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(10): 2701－2707.
PENG Shu-quan, ZHOU Jian, FAN Ling, et al. Research on earth pressure of rigid retaining wall considering soil arching[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(10): 2701－2707.

[11] 王梅, 李镜培. 考虑土拱效应的刚性挡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 Jing-pei. New method for active earth pressure of rigid retain in walls considering soil arching effect[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2013, 35(5): 865－870.

[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 Tang-dai, HE Peng-fei, et al. AI Hong-li. Analysis of active earth pressure on rigid retaining walls considering soil arching[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2014, 35(7): 1914－1920.

[13] 刘忠玉, 陈捷, 李东阳. 考虑剪应力作用的刚性挡土墙主动土压力分析[J]. 岩土力学, 2016, 37(9): 2443－2450.
LIU Zhong-yu, CHEN Jie, LI Dong-yang. Calculation of active earth pressure against rigid retaining wall considering shear stress[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2016, 37(9): 2443－2450.

[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]. **Journal of Soil Mechanics and Foundations Engineering, ASCE**, 1965, 91(4): 197－200.

[15] ELLIS H B. Use of cycloidal arcs for estimating ditch safety[J]. **Journal of Soil Mechanics and Foundations Division**, 1973, 99(2): 165－197.

[16] 曹振民. 挡土墙填土曲线滑裂面主动土压力分析[J]. 中国公路学报, 1995, 8(增刊 1): 7－14.
CAO Zhen-min. Analysis of active earth pressure of backfill on retaining wall with curved rupture surface[J]. **Chinese Journal of Highway and Transport**, 1995, 8(Supp.1): 7－14.

[17] MOTTA E. Generalized coulomb active-earth pressure for distanced surcharge[J]. **Journal of Geotechnical Engineering**, 1994, 120(6): 1072–1079.

[18] 应宏伟, 蒋波, 谢康和. 平行竖墙间的土拱效应与侧土压力计算[J]. 水利学报, 2006, 37(11): 1303－1308.
YING Hong-wei, JIANG Bo, XIE Kang-he. Soil arching and estimation of earth pressure on two parallel vertical walls[J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 2006, 37(11): 1303－1308.

[19] FANG Y, ISHIBASHI I. Static earth pressures with various wall movements[J]. **Journal of Geotechnical Engineering, ASCE**, 1986, 112(3): 317－333.

[20] 赵树德, 赵树惠. 用对数螺旋线滑裂面计算挡土墙主动土压力[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2002, 34(4): 342－345.
ZHAO Shu-de, ZHAO Shu-hui. Calculation of earth pressure of active retaining wall with logistic spiral sliding surface[J]. **Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition)**, 2002, 34(4): 342－345.

[21] 王奎华, 马少俊, 吴文兵. 挡土墙后曲面滑裂面下黏土主动土压力计算[J]. 西南交通大学学报, 2011, 46(5): 732－738.
WANG Kui-hua, MA Shao-jun, WU Wen-bing. Active earth pressure of cohesive soil backfill on retaining wall with curved sliding surface[J]. **Journal of Southwest Jiaotong University**, 2011, 46(5): 732－738.