

文章编号: 1000-7598 (2014) 07-1914-07

考虑土拱效应的刚性挡墙主动土压力分析

王 杰^{1,2}, 夏唐代^{1,2}, 贺鹏飞^{1,2}, 黄 博^{1,2}

(1. 浙江大学 软弱土与环境土工教育部重点实验室, 杭州 310058; 2. 浙江大学 滨海和城市岩土工程研究中心, 杭州 310058)

摘 要: 以墙后填土为无黏性土的刚性挡土墙为研究对象, 考虑墙后土体的土拱效应, 修改了 Shubhra Geol 抛物线形土拱表达式, 推导了对应不同内摩擦角和墙-土摩擦角的挡土墙平动模式下的主动土压力系数。基于水平微分单元法, 得到考虑土拱效应的主动土压力分布、合力大小和合力作用点高度的理论表达式, 并与现有经典理论解及前人理论研究成果和模型试验数据进行对比分析, 结果表明, 主动土压力与墙-土接触面摩擦角、土体内摩擦角、土体重度和挡墙高度相关, 土压力分布为非线性, 与其他结果比较吻合, 从而验证了该研究成果的正确性。

关 键 词: 土拱效应; 土压力; 挡土墙; 水平微分单元法

中图分类号: TU 432

文献标识码: A

Analysis of active earth pressure on rigid retaining walls considering soil arching

WANG Jie^{1,2}, XIA Tang-dai^{1,2}, HE Peng-fei^{1,2}, HUANG Bo^{1,2}

(1. Key Laboratory of Soft Soils and Geoenvironmental Engineering of Ministry of Education, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China;

2. Research Center of Coastal and Urban Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: Taking a rigid retaining wall with cohesionless backfill for example, considering the soil arching, the active earth pressure factor is derived for retaining wall under translation mode with different internal friction angles and wall-soil friction angles. The Shubhra Geol parabolic soil arching expression is modified. Based on horizontal differential element method, new formulations are proposed for calculating the active earth pressure, the resultant earth pressure and its action point. In order to check the accuracy of the proposed formulation, the predictions from the equation are compared with the results of full-scale test and existing classical theory. The results show that the active earth pressure is related to wall-soil friction angle, the internal friction angle, the unit weight of backfill and the height of retaining wall. It is shown that the earth pressure is nonlinear and the previous research results show great agreement with each other; and the correctness of the results is verified.

Key words: soil arching; active earth pressure; retaining wall; horizontal differential element method

1 引 言

挡土墙是防止土体坍塌的构筑物, 在房屋建筑、桥梁、道路、隧道以及水利工程中得到广泛应用。挡土墙主动土压力计算一直是实际工程应用中挡土墙设计的重要课题。工程实践中, 以经典的库仑土压力和朗肯土压力理论为代表的极限平衡理论^[1]被广泛应用。其中朗肯理论假定墙背光滑, 得到的土压力为线性分布; 库仑理论通过建立平面楔体的静力平衡条件得到了土压力合力, 根据合力表

达式假定土压力为线性分布。然而, 大量的室内试验和现场试验 (Tsagareli^[2]、Matsuo^[3]、Fang^[4]等) 得出的结论却与朗肯和库仑土压力线性分布的结论不同, 试验结果表明, 墙背土压力为非线性分布, 墙背土压力的分布与挡土墙的平移模式有直接关系。如图 1 所示, 挡土墙的平移模式有 3 种: 平动模式、绕墙顶转动和绕墙脚转动。

土拱效应是因为土体内部应力转移而产生的一种现象, 这种应力转移是通过土体抗剪强度的发挥而实现的。Terzaghi^[5]通过活动门试验解释了土拱

收稿日期: 2013-06-06

基金项目: 国家自然科学基金高速铁路基础研究联合基金重点支持项目(No. U1234204)。

第一作者简介: 王杰, 男, 1988 年生, 硕士, 主要从事土压力和土动力学方面的研究。E-mail: 21112078@zju.edu.cn

着进行基于土拱效应考虑的刚性挡土墙土压力研究,得到了丰富的成果。Handy^[6]将土拱定义为小主应力的轨迹线,直接假定其形状为悬链线,假定滑裂面的水平倾角为 $\pi/4+\varphi/2$,挡土墙后滑裂面处的小主应力为水平方向,得到墙后土压力分布,但当 $\varphi=0^\circ$ 时,给出的侧土压力系数的表达式,计算的侧土压力系数为1.06,并不等于1.0。Paik^[7]假定土拱形状为圆弧形,滑裂面的水平倾角不随墙-土摩擦角变化,保持为 $\pi/4+\varphi/2$ 不变,给出了平动模式下挡土墙主动土压力的计算公式。Shubhra Geol^[8]假定土拱形状为抛物线形,采用极坐标表达式,同时采用水平倾角为 $\pi/4+\varphi/2$ 的水平滑裂面和抛物线形滑裂面进行对比分析,但在求解侧土压力系数过程中,抛物线土拱的竖向平均应力积分表达式有误。应宏伟等^[9-14]分别假定不同形状的土拱进行理论分析,在试验和理论上都证明,由于挡墙后土拱效应(土压力从屈服区域转移到邻近静止区域的现象^[5]),作用在挡土墙上的主动土压力为非线性分布,取得了较好的研究成果。

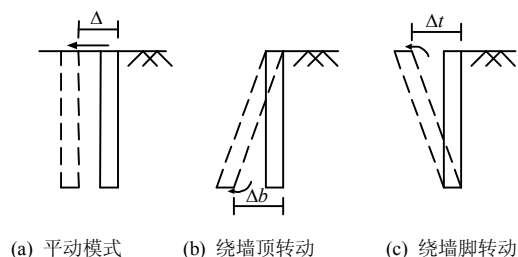


图1 刚性挡土墙平移模式^[8]
Fig.1 Translation modes of rigid walls^[8]

本文在 Shubhra Geol^[8]研究基础上,考虑土拱效应,假定土拱形状为抛物线形,采用极坐标表达式,假设墙后土体的滑裂面为平面,主应力发生偏转,偏转角由墙面处的最大值逐渐减小到滑裂面处为0,滑裂面为小主应力拱的拱顶面,小主应力轨迹从墙面到滑裂面形成半个土拱。本文研究了平动模式下作用在刚性挡土墙上的主动土压力,推导出了新的主动土压力系数解析解以及作用在挡土墙上的主动土压力解析解,并与模型试验数据及其他土压力理论进行比较分析。

2 理论分析

2.1 平面滑裂面

众所周知,无论刚性挡土墙发生转动还是平动,墙后土体都会相应地出现滑裂面,而滑裂面的

形状不仅与墙-土摩擦角 δ 有关,而且还与挡土墙的平移模式有很大关系。当墙背光滑, $\delta=0^\circ$ 时,滑裂面为一平面;当墙背粗糙, $\delta\neq 0^\circ$ 时,滑裂面为与挡墙平移模式相关的曲面^[5]。

对于墙背粗糙的刚性挡墙,当发生不同形式的平移模式时,墙后土体滑裂面的形状如图2所示^[4-5]。当挡土墙绕墙脚转动时,滑裂面下部为曲面,上部为平面,主动土压力分布形式近似三角分布;当墙后土体表面水平且无超载,挡土墙绕墙顶转动时,滑裂面为一曲面,且正交于土体表面,主动土压力分布近似抛物线分布;当挡土墙发生平动时,滑裂面的形状及主动土压力分布将更加复杂^[5]。

当挡土墙后填土为无黏性土时,挡墙后土体的滑裂面可假定为水平倾角为 $\pi/4+\varphi/2$ 的平面滑裂面,Handy^[6]、Paik^[7]通过这一假定的平面滑裂面,推导得到了刚性挡墙后主动土压力的非线性分布。为简化理论计算分析,本文将墙后土体滑裂面假设为水平倾角 $\pi/4+\varphi/2$ 的平面滑裂面。另外,在本文的理论研究中,还假设:①挡土墙墙背垂直、填土面水平、墙后无超载作用;②墙后填土及填土与墙背间的抗剪强度准则满足摩尔-库仑准则;③墙后填土的土拱为小主应力拱,土拱形状为抛物线形,具体讨论见2.3节。

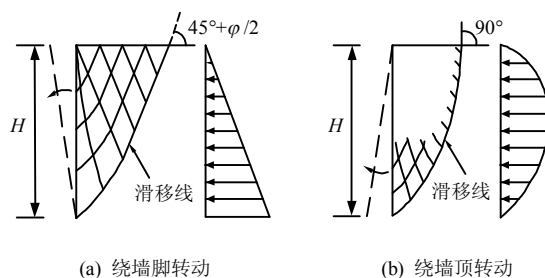


图2 挡土墙滑移线场图^[7]
Fig.2 Slip surfaces in backfill^[7]

2.2 主应力旋转

Paik^[7]已经详细讨论过主应力旋转的内容,为了便于理解,本文简略作如下论述。如图3所示,作用在水平微单元体上的大主应力正交于虚线表示的土拱线,而虚线表示的土拱线即是小主应力轨迹,在微单元体右侧的直线滑裂面处,大、小主应力分别为竖向和水平向,因此,滑裂面处即为抛物线形土拱的拱顶面。

如图4所示,水平微分单元墙边水平方向的主动土压力为

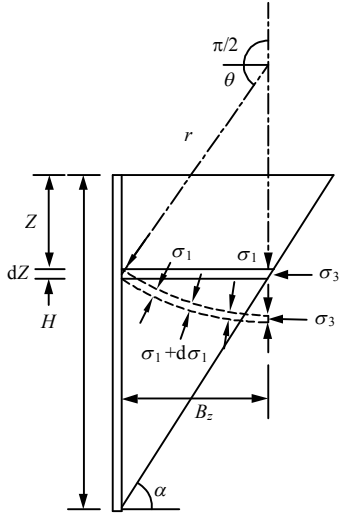


图 3 小主应力轨迹线图^[7]
Fig.3 Trajectory of minor principal stress^[7]

$$\sigma_{ahw} = \sigma_1 \cos^2 \theta + \sigma_3 \sin^2 \theta \quad (1)$$

同样, 图 4 中抛物线土拱上的 D 点 (起始点为 B 点) 的水平侧向应力为

$$\sigma_{ah} = \sigma_1 \cos^2 \psi + \sigma_3 \sin^2 \psi \quad (2)$$

式中: ψ 为 D 点切向与垂直方向的夹角。

当土体处于主动极限状态时, 将式 (2) 除以 σ_1 , 并代入 $\sigma_3 / \sigma_1 = 1/N$ 有

$$\sigma_{ah} / \sigma_1 = \cos^2 \psi + 1/N \sin^2 \psi \quad (3)$$

式中: $N = \tan^2 (\pi/4 + \varphi/2)$, 为大小主应力比。

又

$$\sigma_1 + \sigma_3 = \sigma_v + \sigma_{ah} \quad (4)$$

将式 (4) 代入式 (3) 有

$$\sigma_v / \sigma_1 = \sin^2 \psi + 1/N \cos^2 \psi \quad (5)$$

根据 Handy^[6]、Paik^[7]的研究成果, 当墙-土间摩擦力充分发挥, 即当 $\delta = \varphi$ 时, 有

$$\theta = \pi/4 + \varphi/2 \quad (6)$$

式中: θ 为墙边小主应力平面与水平面的夹角。

当墙-土摩擦力部分发挥, 即当 $\delta < \varphi$ 时, 墙边的小主应力面与水平面的夹角 θ (取大值) 为

$$\theta = \tan^{-1} \left[\frac{N - 1 \pm \sqrt{(N - 1)^2 - 4N \tan^2 \delta}}{2 \tan \delta} \right] \quad (7)$$

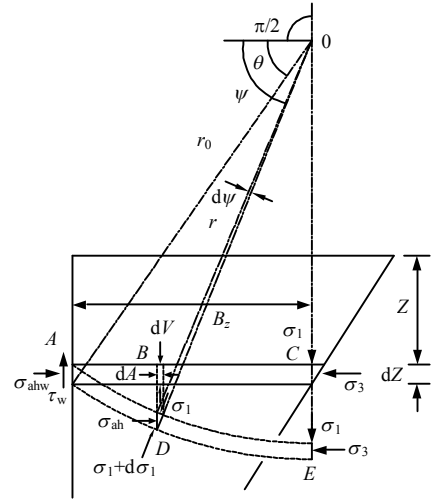


图 4 墙后水平微分单元应力图^[8]
Fig.4 Stresses on horizontal differential element in backfill^[8]

2.3 抛物线形拱的基本方程

假设小主应力轨迹线为抛物线形, 采用水平倾角为 $\pi/4 + \varphi/2$ 的直线滑裂面, 而滑裂面与小主应力的夹角亦是 $\pi/4 + \varphi/2$, 二者角度相等, 因此, 在水平微分单元右端小主应力为水平向, 滑裂面即为抛物线拱顶面。Shubhra Geol^[8]采用抛物线土拱的极坐标方程为

$$r = (2\beta)/(1 - \cos \psi) \quad (8)$$

式中: β 为抛物线形土拱的形状参数; r 为墙后土拱任意一点的极径; ψ 为墙后土拱任意一点的极角。

根据《数学手册》^[15]可知, 抛物线的极坐标方程为

$$r = p/(1 - \cos \chi) \quad (9)$$

式中: p 为抛物线形状参数; χ 为任意一点的极角。

极点位于焦点 ($p/2, 0$) 上, 极轴与抛物线的轴重合, 背向顶点。对照式 (8)、(9) 可知, Shubhra Geol^[8]采用抛物线方程的极角 ψ 有误, 应为 $\psi + \pi/2$ 。

由图 4 可知, 抛物线上点 E 为抛物线顶点, O 点为抛物线焦点, 因此, 直线 EO 为抛物线极轴, 图上任意一点可表示为 $(r, \psi + \pi/2)$, 因此, A 点坐标可表示为 $(r_0, \theta + \pi/2)$ 。本文采用抛物线形土拱的极坐标方程为

$$r = (2\beta)/(1 - \cos \xi) \quad (10)$$

式中: ξ 为墙后土拱任意一点的极角 ($\xi = \psi + \pi/2$)。

由图 4 可知, 在某一深度 z 处, 微单元体的宽

度 B_z 为

$$B_z = r_0 \cos \theta \quad (11)$$

式中: r_0 为墙背 A 点小主应力土拱线的极径。

水平微分单元土体受力如图 4 所示, 作用于 B 点阴影单元土体上的竖向力 dV 为

$$dV = \sigma_v dA = \sigma_1 (\sin^2 \psi + \cos^2 \psi / N) \cdot rd\xi \sin(\xi - \pi/2) \quad (12)$$

式中: dA 为土体单元宽度。

深度 z 处土体单元平均竖向应力 $\bar{\sigma}_v$ 为

$$\bar{\sigma}_v = V / B_z = \int_{\theta+\pi/2}^{\pi} dV / B_z = \int_{\theta+\pi/2}^{\pi} \frac{\sigma_1 (\sin^2 \psi + \cos^2 \psi / N) (2\beta \sin \psi) d\xi}{(1 - \cos \xi) [2\beta \cos \theta / (1 - \cos(\theta + \pi/2))]} = \int_{\theta}^{\pi/2} \frac{\sigma_1 (\sin^2 \psi + \cos^2 \psi / N) (2\beta \sin \psi) d\psi}{(1 + \sin \psi) [2\beta \cos \theta / (1 - \cos(\theta + \pi/2))]} \quad (13)$$

至此, 对照式 (13) 与 Shubhra Geol^[8] 的式 (16) (本文标记为式 (14)) 可知, Shubhra Geol^[8] 的竖向平均应力积分表达式有误。

$$\bar{\sigma}_v = V / B_z = \int_{\theta}^{\pi/2} \frac{\sigma_1 (\sin^2 \psi + \cos^2 \psi / N) (2\beta \sin \psi) d\psi}{(1 - \cos \psi) [2\beta \cos \theta / (1 - \cos \theta)]} \quad (14)$$

本文的抛物线方程还可直接采用如下表达式:

$$r = (2\beta) / (1 + \sin \psi) \quad (15)$$

则作用于 B 点阴影单元土体上的竖向力为

$$dV = \sigma_v dA = \sigma_1 (\sin^2 \psi + \cos^2 \psi / N) \cdot (rd\psi \sin \psi) \quad (16)$$

对式 (13) 积分可得

$$\left. \begin{aligned} \bar{\sigma}_v &= K \frac{\sigma_1 (1 + \sin \theta)}{\cos \theta} \\ K &= \frac{3}{4} \pi - \frac{3}{2} \theta + \frac{1}{4} \sin 2\theta - \cos \theta - \tan \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\theta}{2} \right) + \frac{1}{N} \left(-\frac{\pi}{4} + \cos \theta + \frac{\theta}{2} - \frac{1}{4} \sin 2\theta \right) \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

2.4 主动侧压力系数

根据式 (1)、(17) 可求得主动侧土压力系数为

$$K_{awn} = \frac{\sigma_{ahw}}{\bar{\sigma}_v} = \frac{\cos^2 \theta + \sin^2 \theta / N}{K \frac{1 + \sin \theta}{\cos \theta}} \quad (18)$$

对比本文与应宏伟^[10]主动侧压力系数推导公式, 侧压力系数分子是相同的, 而分母不同。

2.5 墙后主动土压力

刚性挡土墙墙后土体微分单元体受力如图 5 所示。如前所述, 直线滑裂面水平倾角为 $\pi/4 + \varphi/2$, 因此, 微分单元体上的大、小主应力在单元体右侧滑裂面处分别为竖直和水平方向, 大、小主应力面上剪应力为 0。但微分单元体左侧墙背处的剪应力 τ_w 不为 0, 其值为

$$\tau_w = \sigma_{ahw} \tan \delta = \bar{\sigma}_v K_{awn} \tan \delta \quad (19)$$

显然, 微分单元体右侧的水平面和竖直面上的剪应力为 0, 右侧三角形单元处于静力平衡状态。

根据作用在微分单元体上的竖向力的平衡条件, 可得矩形微分单元体的静力平衡方程为

$$d\bar{\sigma}_v B_z + \bar{\sigma}_v K_{awn} \tan \delta \cdot dz = \gamma B_z dz \quad (20)$$

将 $B_z = (H - z) / \tan \alpha$ 代入式 (20) 求解得到微分方程的通解为

$$\left[\bar{\sigma}_v + \frac{\gamma(H - z)}{1 - \beta} \right] (H - z)^{-\beta} = C \quad (21)$$

式中: $\beta = K_{awn} \tan \delta \tan \alpha$; H 为挡土墙高度; z 为土压力计算点到挡土墙顶的距离; C 为积分常数。

将边界条件 $z = 0$ 时, $\bar{\sigma}_v = 0$ 代入式 (21), 解得平均竖向应力为

$$\bar{\sigma}_v = \frac{\gamma H}{1 - \beta} \left[(1 - z/H)^{\beta} - (1 - z/H) \right] \quad (22)$$

将式 (22) 乘以式 (18) 可得任意深度处的水平向主动土压力为

$$\sigma_{ahw} = \frac{\gamma H K_{awn}}{1 - \beta} \left[(1 - z/H)^{\beta} - (1 - z/H) \right] \quad (23)$$

将式 (23) 沿墙高积分, 得水平土压力合力为

$$P_{ah} = \int_0^H \sigma_{ahw} dz = \frac{\gamma H^2 K_{awn}}{2(1 + \beta)} \quad (24)$$

土压力合力为

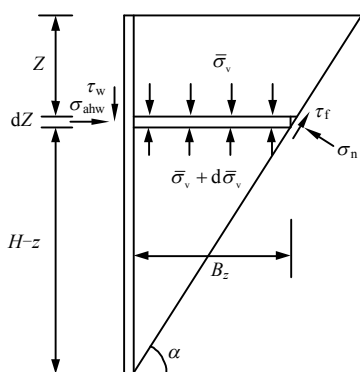
$$P_a = P_{ah} / \cos \delta \quad (25)$$

土压力对墙脚的力矩为

$$M = \int_0^H \sigma_{ahw} (H - z) dz = \frac{\gamma H^3 K_{awn}}{3(2 + \beta)} \quad (26)$$

合力作用点距离墙脚的高度为

$$h = M / P_{ah} = \frac{2(1+\beta)H}{3(2+\beta)} \quad (27)$$

图5 微分单元体受力图^[7]Fig.5 Free body diagram of differential element^[7]

3 讨论

3.1 参数讨论

图6所示高为4 m的刚性挡墙,假定 $\delta = \varphi$,挡墙后水平向主动土压力的分布随土体摩擦角 φ 值变化的情况。本文的土压力分布趋势与Paik分布基本相同,当 $\varphi = 10^\circ$ 时,本文解比Paik值大7%左右,随 φ 增大,本文解与Paik解的差值逐渐减小。同时图6给出了 $\varphi = 0^\circ$ 时的库仑土压力分布,为直线型分布,考虑土拱效应计算得到的主动土压力分布为曲线型分布。图7~9中,挡墙底部土压力分布趋于0,是由于墙后土体破坏时,滑裂面经过挡墙底造成的。随着深度增加,水平微分单元土层的宽度逐渐减小,土拱左端墙边小主应力偏转角趋于0,小主应力平面与水平面的夹角 θ 趋于 $\pi/2$,平均竖向应力积分值趋于0,从而导致水平向主动土压力值趋于0。

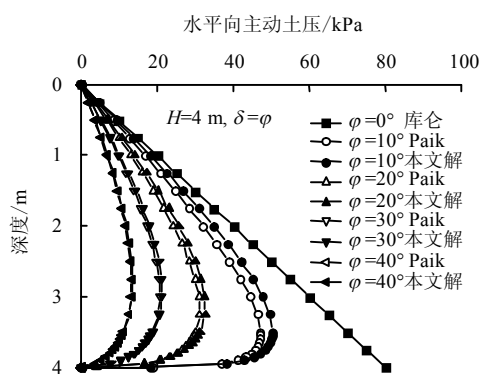
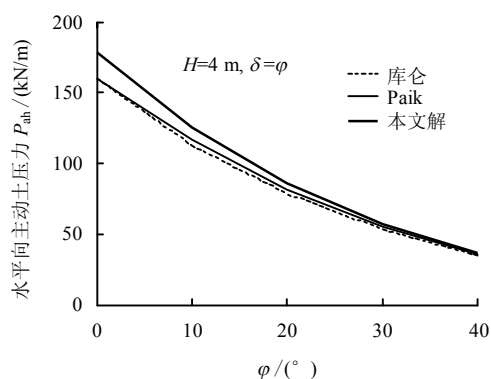
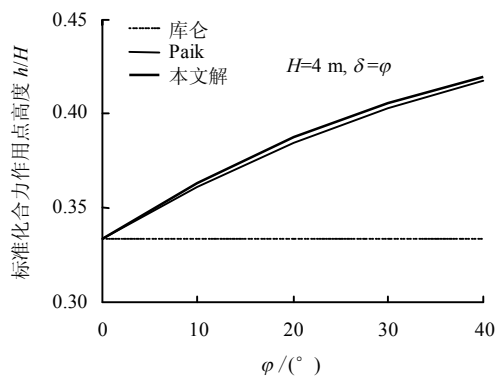
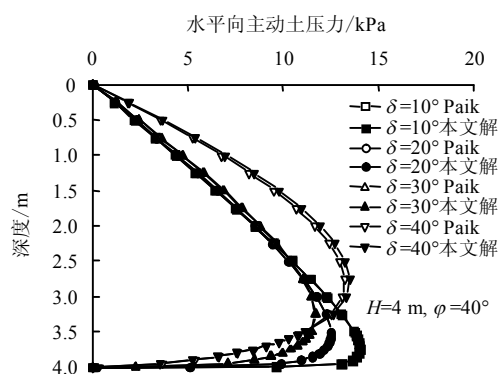
图6 主动土压力随 φ 的变化Fig.6 Changes of active earth pressure distribution with φ

图7为上述挡墙后主动土压力大小及其作用点随 φ 值变化的情况。如图7(a)所示,主动土压力随 φ

值增加而减小,本文解均大于Paik及库仑土压力值。如图7(b)所示,主动土压力合力作用点随 φ 值增大而升高,本文解合力作用点高于Paik及库仑合力作用点。

图8所示高为4 m的刚性挡墙,假定 $\varphi = 40^\circ$,挡墙后水平向主动土压力的分布随墙土摩擦角 δ 值变化的情况。当 δ 值较小时,本文解土压力分布基本与Paik分布重合,随着 δ 值增大,本文解逐渐大于Paik分布。

(a) 主动土压力随 φ 变化情况(b) 主动土压力作用点随 φ 变化情况图7 主动土压力大小及作用点高度随 φ 的变化Fig.7 Changes of active earth pressure and its action point height with φ 图8 主动土压力分布随 δ 的变化Fig.8 Changes of active earth pressure distribution with δ

3.2 实例对比分析

Tsagareli^[2]进行了刚性挡土墙平移模式下不同墙高(2.0、2.5、3.0、3.5、4.0 m)情况下的主动土压力分布模型试验, 试验参数为 $\gamma=17.65 \text{ kN/m}^3$,

$\delta=\varphi=37^\circ$ 。图9给出了不同墙高情况下 Paik 解、本文解和模型试验的对比结果, 总体而言, 本文解主动土压力分布情况与 Paik 解总体趋势相同, 但比 Paik 解更加吻合模型试验值。

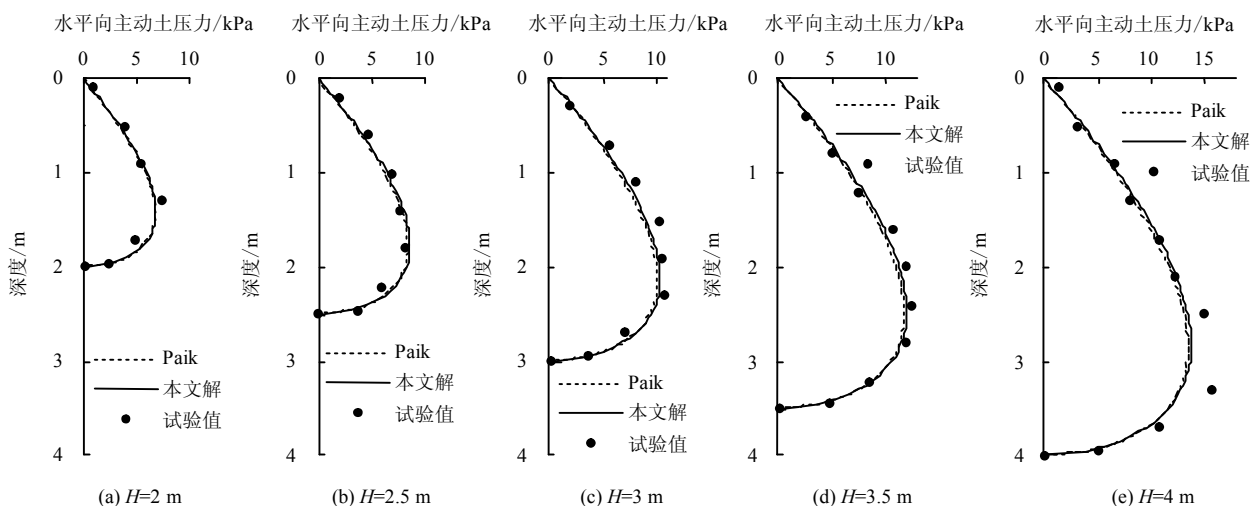


图9 主动土压力本文解与 Paik 解及试验值对比

Fig.9 Comparisons between predicted and measured distributions of active earth pressure

4 结 论

(1) 无黏性土刚性挡土墙平动模式下, 墙后填土发生主应力旋转, 主动情况下土拱为小主应力迹线, 其形状可假设为抛物线形, 采用极坐标表达式, 可得到主动侧压力系数, 结合水平微分单元法, 采用直线滑裂面, 得到改进的主动土压力分布、合力及合力作用点计算公式。

(2) 本文计算主动土压力分布总体趋势与 Paik 解土压力分布基本一致, 主动土压力值较 Paik 土压力和库仑土压力稍大, 合力作用点高于 Paik 土压力和库仑土压力合力作用点。

(3) 本文解主动土压力分布与模型试验结果吻合较好。

(4) 本文得到的主动土压力及其作用点公式, 力学概念明确, 简单方便, 公式计算值与模型试验实测值吻合较好, 可供工程计算及设计参考。

参 考 文 献

- [1] 龚晓南. 土力学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
- [2] 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, 91(4): 197—200.
- [3] MATSUO M, KENMOCHI S, YAH I H. Experimental study on earth pressure of retaining wall by field tests[J]. *Soils and Foundations*, 1978, 18(3): 27—41.
- [4] FANG Y, ISHIBASHI I. Static earth pressures with various wall movements[J]. *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, 1986, 112(3): 317—333.
- [5] TERZAGHI K. Theoretical soil mechanics[M]. New York: John Wiley and Sons, 1943: 66—76.
- [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 effects[J]. *Geotechnique*, 2003, 53(7): 643—653.
- [8] SHUBHRA GOEL, 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.
- [9] 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 Hong-wei, XIE Kang-he. Analysis of soil arching behind retaining wall[J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2005, 39(1): 131—136.

131—136.

- [10] 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.

- [11] 候键, 夏唐代, 孔祥冰, 等. 基于土拱效应原理求解挡土墙被动土压力[J]. 岩土力学, 2012, 33(10): 2996—3000.

HOU Jian, XIA Tang-dai, KONG Xiang-bing, et al. Passive earth pressure on retaining walls calculated by principle of soil arching effect[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2012, 33(10): 2996—3000.

- [12] 陈林, 张永兴, 冉可新. 考虑剪应力作用的挡土墙主动土压力计算[J]. 岩土力学, 2009, 30(增刊 2): 219—223.

CHEN Lin, ZHANG Yong-xing, RAN Ke-xin. A method for calculating active earth pressure considering shear stress[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(Supp.2): 219—223.

- [13] 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.

- [14] 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.

- [15] 《数学手册》编写组. 数学手册[M]. 北京: 高等教育出版社, 1979.

上接第 1913 页

- [12] 葛兆龙, 卢义玉, 梅绪东, 等. 一种煤矿井下高压水力压裂封孔材料及封孔工艺: 中国, ZL201210578643.5[P]. 2013-3-20.

- [13] 刘大金. 土体中水平钻孔孔壁稳定性分析及试验研究[D]. 长春: 吉林大学, 2006.

- [14] 翟成, 李全贵, 孙臣, 等. 松软煤层水力压裂钻孔失稳分析及固化成孔方法[J]. 煤炭学报, 2012, 37(9): 1431—1436.

ZHAI Cheng, LI Quan-gui, SUN Chen, et al. Analysis on borehole instability and control method of poreforming of hydraulic fracturing in soft coal seam[J]. **Journal of China Coal Society**, 2012, 37(9): 1431—1436.

- [15] 康红普. 巷道围岩的关键圈理论[J]. 力学与实践, 1997, 19(1): 34—36.

KANG Hong-pu. The theory of key circle of roadway surrounding rock[J]. **Mechanics and Practice**, 1997, 19(1): 34—36.

- [16] 刘俊杰. 采场前方应力分布参数的分析与模拟计算[J].

煤炭学报, 2008, 33(7): 743—747.

LIU Jun-jie. Analysis and calculation on parameters of stress distribution of the front coal mining face[J]. **Journal of China Coal Society**, 2008, 33(7): 743—747.

- [17] 郭红玉. 基于水力压裂的煤矿井下瓦斯抽采理论与技术[D]. 焦作: 河南理工大学, 2011.

- [18] 刘奎. 掘进面“三压带”分段注水机理及应用研究[J]. 中国安全科学学报, 2011, 21(4): 109—114.

LIU Kui. Study on mechanism and application of sectional water infusion in “three-stress-zone” of driving face[J]. **China Safety Science Journal**, 2011, 21(4): 109—114.

- [19] 刘建新, 李志强, 李三好. 煤巷掘进工作面水力挤出措施防突机理[J]. 煤炭学报, 2006, 31(2): 183—186.

LIU Jian-xin, LI Zhi-qiang, LI San-hao. Protection against outburst mechanism of hydraulic extrusion measure in the front of coal road heading face[J]. **Journal of China Coal Society**, 2006, 31(2): 183—186.