

文章编号: 1000-7598-(2008) 04-1057-05

土拱效应原理求解挡土墙土压力方法的改进

章瑞文, 徐日庆

(浙江大学 建筑工程学院, 杭州 310027)

摘 要: 对应用土拱效应原理求解挡土墙主动土压力强度分布存在其所采用的滑裂面不满足墙后滑裂楔体水平力平衡等问题进行分析, 提出水平力平衡的滑裂面水平倾角的计算方法; 由此根据单元水平土层的静力平衡条件建立了竖向土压力强度、挡土墙主动土压力强度、土压力合力及其作用位置的计算公式。对运用该公式的计算结果与其他方法计算值及模型试验成果进行比较, 结果表明文中方法安全性高且最接近试验结果。

关 键 词: 挡土墙; 土拱效应; 滑裂面水平倾角; 土压力强度分布

中图分类号: TU 431

文献标识码: A

Solution of problem of earth pressure on retaining wall calculated by method of soil arching effect

ZHANG Rui-wen, XU Ri-qing

(School of Constructional Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: The problems that the horizontal static equilibrium of the slice with the sliding surface of soil arching effect is not possible in calculating the distribution of the unit earth pressure on retaining wall are presented. And according to the static equilibrium of horizontal-stratum soil in the sliding wedge, the equation of calculating the angle of failure line to horizontal are formed. Equations of calculating the unit earth pressure, the resultant earth pressure and the points of application of resultant earth pressure on retaining wall are set up. Comparison among the results calculated by formula presented here and the other methods and the experimental observations is made. It is demonstrated that the calculating results by this paper's method have better safety and agreement with those of the experimental observations than those by the other methods.

Keywords: retaining wall; soil arching effect; angle of failure line to horizontal; distribution of unit earth pressure

1 引 言

在挡土墙土压力的两大经典理论中, 朗金土压力理论不考虑墙面摩擦的作用(假设墙面光滑), 从墙背滑裂土体的应力状态出发(土体的剪应力达到抗剪强度), 得出了滑裂面为一平面, 土压力强度沿墙背线性分布。库伦土压力理论则考虑墙面摩擦的作用, 假设滑裂面为一平面并满足土压力最大值, 建立起滑裂面水平倾角的计算公式; 假设滑裂面、墙面摩擦均匀分布, 从墙背滑动楔体的静力平衡得到挡土墙土压力强度沿墙背线性分布的土压力解。这两大土压力理论, 因其计算简单和力学概念明确而并成为挡土墙土压力的经典理论, 得到工程界的广泛采用; 但实际上挡土墙土压力强度并非非线性分

布, 国内外大量的室内试验和现场测试结果表明挡土墙土压力强度呈非线性分布, 土压力作用点不在 1/3 墙高处。卡岗^[1]在 1960 年发表《论挡土墙上非线性分布土压力》中对墙面垂直、墙背填筑砂性土、填土面水平的刚性挡土墙首先采用水平层分析法进行了计算, 得到土压力强度沿墙高非线性分布, 分布图形为曲线形; 但他假设水平土层的竖向应力呈均匀分布, 欠缺考虑墙后土体的土拱效应(主应力偏转)。王元战^[2]通过库伦滑裂面的单元水平土层的静力平衡, 对土侧压力系数进行了计算并建立了土压力强度的计算方法, 同样也存在假设水平土层的竖向应力呈均匀分布而未考虑土拱效应的问题。Handy^[3](1985 年), Paik^[4](2003 年)根据土拱效应原理按朗肯滑裂面建立了土侧压力系数及土压力

收稿日期: 2006-04-04

作者简介: 章瑞文, 男, 1964 年生, 博士, 高级工程师, 从事岩土工程研究。E-mail: zrw_mail@126.com

$$p_{xE} = \frac{(1-K_a)\sigma_1}{2\sin\phi}(1-\cos\psi_E\sin\phi) \quad (10)$$

$$p_{yE} = \frac{(1-K_a)\sigma_1}{2\sin\phi}(1+\cos\psi_E\sin\phi) \quad (11)$$

$$\tau_E = \frac{(1-K_a)\sigma_1}{2}\sin\psi_E \quad (12)$$

$$R_x = \frac{(1-K_a)\sigma_1}{2} \frac{\cos\phi\sin(\alpha-\phi)}{\sin\phi\sin\alpha} dy \quad (13)$$

$$R_y = \frac{(1-K_a)\sigma_1}{2} \frac{\cos\phi\cos(\alpha-\phi)}{\sin\phi\sin\alpha} dy \quad (14)$$

3 滑裂面分析及其水平倾角的计算

3.1 所采用小主应力拱拱顶面不合理、单元水平土层的水平力并不平衡

(1) 文献[3], [4]采用朗肯滑裂面作为小主应力拱的拱顶面, 当然朗肯滑裂面上土体的剪应力为 0, 符合小主应力拱拱顶面的要求; 但是在墙面存有摩擦的情况下, 朗肯滑裂面不可能存在, 实际上水平倾角为 $\pi/4+\Phi/2$ 的面既非滑裂面, 也不满足小主应力拱拱顶面的要求。另外, 墙后滑裂楔体的水平土层的两端水平力为 $p_{xD} > p_{xE} = \sigma_3$, 并不满足静力平衡的要求。

(2) 文献[5]采用库仑滑裂面, 并认为水平倾角为 $\pi/4+\Phi/2$ 的面满足剪应力为 0 的要求(是小主应力拱拱顶面)。显然 $\pi/4+\Phi/2$ 面在墙面摩擦的作用下剪应力已不再为 0, 且库仑土压力理论滑裂面根据挡土墙土压力最大原则按下式计算:

$$\alpha_E = \text{atan} \left\{ \sqrt{[\tan(\phi+\delta) + \cot\phi]\tan(\phi+\delta)} - \tan(\phi+\delta) \right\} \quad (15)$$

计算得的 α_E 小于 $\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2}$, 表明库仑滑裂面处土体的主应力偏转方向与墙面处的相同。

E 点满足:

$$R_x = p_{xE} dy - \tau_E \cot\alpha_E dy \quad (16)$$

由此可知 $R_x < p_{xE} dy$

$$p_{xE} - p_{xD} = \frac{(1-K_a)(\cos\psi_D - \cos\psi_E)}{2} \sigma_1$$

由于 $\psi_D > \psi_E$, $p_{xE} < p_{xD}$, 得:

$$R_x < Q_x \quad (17)$$

单元水平土层在墙面和滑裂面两端的水平力并不平衡, 墙面处水平力比滑裂面处大。反之若假定两端水平力相等, 则墙面处土体达到极限平衡时(摩尔圆与破裂线相切)滑裂面处土体并未达到极限状态(未相切); 或滑裂面处土体达到极限状态时, 墙面处土体早已破坏。只有当墙面光滑时(朗肯滑裂面)才能得以一致。

(3) 本文根据水平力平衡确定的滑裂面水平倾角大于 $\pi/4 + \Phi/2$, 墙面和滑裂面的主应力偏转方向相反, 因此在墙面和滑裂面之间存在小主应力拱拱顶面(主应力偏转角为 0)。几种面的关系如图 3 所示。

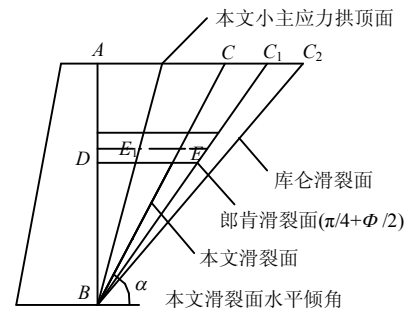


图 3 不同滑裂面之间的关系

Fig.3 Relations between different sliding surfaces

3.2 两端水平力相等的滑裂面水平倾角计算

根据前述公式, 由 $R_x = Q_x$ 并经化简后可得:

$$\alpha_E = \text{atan} \left(\frac{\cos\phi}{\cos\psi_D - \sin\phi} \right) \quad (18)$$

由于 $\psi_D > \psi_E$, $p_{xE} < p_{xD}$, 显然 $\alpha_E > \frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2}$ 。

4 挡土墙主动土压力的计算公式

4.1 单元水平土层竖向土压力强度 p_y 的计算

设单元水平土层的长度为 $l = (H - y - dy) \cdot \cot\alpha_E$, 单元水平土层上下面长度差为 $\Delta = dy \cot\alpha_E$, 则水平土条的重力可表示为

$$dG = \gamma \left(H - y - \frac{dy}{2} \right) \cot\alpha_E$$

单元水平土层上作用的竖向压应力并非均匀分布, 本文近似地采用平均值。根据静力平衡有

$$\left. \begin{aligned} \sum X &= 0 \\ R_x &= Q_x \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

$$\left. \begin{aligned} \sum Y &= 0 \\ p_y(l + \Delta) + dG &= (p_y + dp_y)l + Q_y + R_y \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

$$\left. \begin{aligned} \sum M_E &= 0 \\ Q_y(l + \frac{A}{2}) + (p_y + dp_y)l(\frac{l}{2} + \frac{A}{2}) &= \\ dG(l + \frac{A}{4}) + p_y(l + A)(\frac{l}{2} - \frac{A}{2}) \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

代入各参数联立求解 3 个方程并忽略二阶微量可得:

$$dp_y = \gamma dy - A \frac{p_y dy}{(H-y)} \quad (22)$$

$$\text{式中: } A = 1 - \frac{\cos(\alpha_E - \phi - \delta)}{\cos(\alpha_E - \phi + \delta)} \quad (23)$$

记土侧压力系数为

$$K = \frac{\sin(\alpha_E - \phi) \cos \delta}{\cos(\alpha_E - \phi + \delta) \tan \alpha_E} \quad (24)$$

土压力系数为

$$K_a = \frac{\cos \alpha_E \sin(\alpha_E - \phi)}{\sin \alpha_E \cos(\alpha_E - \phi - \delta)} \quad (25)$$

$$\text{则 } A = 1 - \frac{K}{\cos \delta K_a}$$

竖向土压力强度 p_y 的基本方程为一阶线性非齐次微分方程, 当填土面作用于均布荷载 q_0 时, $y=0$, $p_y=q_0$, 代入求解得:

$$p_y = \frac{[q_0(A+1) + \gamma H]H^A}{(A+1)(H-y)^A} - \frac{\gamma(H-y)}{(A+1)} \quad (26)$$

挡土墙土压力强度为

$$p = \frac{p_x}{\cos \delta} = \frac{K}{\cos \delta} p_y \quad (27)$$

挡土墙土压力的合力 $Q = \int_0^H p dy$ 积分得:

$$Q = \frac{K}{(1-A)\cos \delta} \frac{1}{2} \gamma H^2$$

$$\text{即 } Q = K_a \frac{1}{2} \gamma H^2 \quad (28)$$

挡土墙土压力合力距墙脚的高度:

$$y_Q = \frac{2(1-A)}{3(2-A)} H \quad (29)$$

5 本文方法计算结果与模型试验成果及其它方法计算值的比较

Fang 和 Ishibashi (1986 年)^[7]对墙背填筑砂性土 ($\Phi=34^\circ$, $\delta=17^\circ$, $\gamma=15.4 \text{ kNm}^3$), 填土面

水平、高 1 m 的直立挡土墙在平移模式下进行了主动土压力试验, 极限状态下所测得的水平土压力分布及本文相应计算值如图 4。根据图 4 计算的土压力结果和本文方法及其他方法的计算值如表 1 所列。

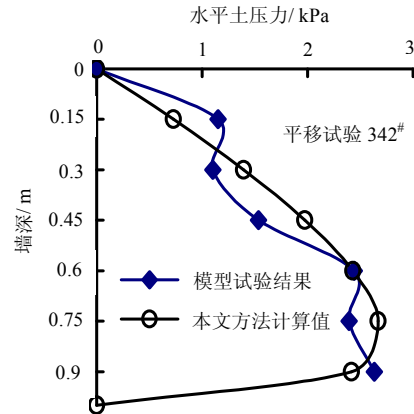


图 4 平移模式下试验结果与本文计算值

Fig.4 Experimental observation and this paper's calculating results at translational wall displacements

表 1 本文方法和其他方法的计算值与试验结果比较
Table 1 Comparison among experimental results and results calculated by this paper's method and others methods

方法	滑裂面水平倾角 / ($^\circ$)	土压力系数 K_a	土压力合力作用位置系数 Y_Q/H	倾覆力矩系数 $K_a Y_Q/H$
模型试验成果		0.237 8	0.388 7	0.092 4
本文方法	63.75	0.239 9	0.391 6	0.093 9
文献[4]方法	62	0.252 1	0.3594	0.090 6
文献[5]方法	59.16	0.245 2	0.364 6	0.089 4
卡岗分析法	59.16	0.245 2	0.381 2	0.093 5

(1) 从图 3 可知, 挡土墙主动土压力强度的分布本文值与模型试验结果较为吻合。在墙体上部比库仑理论值大, 下部比库仑理论值小, 呈非线性分布。

(2) 在墙体上部土压力强度的分布模型试验结果与本文计算值存有一定差距, 主要是由于实际填土的上部密度(墙面摩擦角)比下部大引起的。

(3) 在表 1 中, 文献[4]的 $\alpha = 62^\circ$ 为朗肯滑裂面, 文献[5]和卡岗分析法 $\alpha = 59.16^\circ$ 为库仑滑裂面; $K_a = 0.245 2$ 为库仑土压力系数。比较可知, 本文方法计算的土压力合力作用位置最高, 倾覆力矩系数最大, 偏于安全。

(4) 经比较挡土墙的土压力系数 K_a , 合力作用位置 Y_Q/H 和倾覆力矩系数 $K_a Y_Q/H$ 3 个指标, 均表明本文方法计算结果最接近模型试验结果。可见本文方法基本是可靠的。