

文章编号: 1000-7598-(2005)07-1019-04

挡土墙主动土压力分布与侧压力系数

王元战, 李新国, 陈楠楠

(天津大学 港口与海岸工程系, 天津 300072)

摘 要: 采用库仑土压力理论的假设: 挡土墙土压力是由墙后填土在极限平衡状态下出现的滑动楔体产生, 在该滑动楔体上沿竖向取水平薄层作为微分单元体, 通过作用在单元体上的水平力、竖向力和力矩平衡条件, 建立挡土墙上土压力强度的一阶微分方程式, 给出了土侧压力系数、土压力强度、土压力合力和土压力合力作用点高度的理论公式, 并分析了填土内摩擦角和墙背摩擦角对土侧压力系数、土压力强度、土压力合力、土压力合力作用点和墙底抗倾稳定性的影响。

关 键 词: 挡土墙; 土侧压力系数; 土压力分布

中图分类号: TU 470⁺.3

文献标识码: A

Active earth pressure on a retaining wall and lateral coefficient of earth pressure

WANG Yuan-zhan, LI Xin-guo, CHEN Nan-nan

(Department of Port & Coastal Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: On the basis of coulomb's concept that the earth pressure against the back of a retaining wall is due to the thrust exerted by a sliding wedge of soil between the back of the wall and a plane which passes through the bottom edge of the wall and has an inclination of θ , the differential equations of first order are set up by considering the equilibrium of the forces and the moments on an element of the wedge. The lateral coefficient of earth pressure, the unit earth pressure, the resultant force of earth pressure and the application point of the resultant force are obtained. The effects of the internal frictional angle of backfill and the frictional angle between the wall back and the backfill on the lateral coefficient of earth pressure, the unit earth pressure, the resultant force of earth pressure, the application point of the resultant force and the overturning stability of a retaining wall are investigated.

Key words: retaining wall; lateral coefficient of earth pressure; earth pressure distribution

1 引 言

挡土墙土压力计算一直是工程界和学术界非常关心的问题。从目前看, 土压力计算方法主要有 3 类: 第 1 类是极限平衡理论, 其典型代表是库仑土压力理论和朗肯土压力理论^[1]; 第 2 类是考虑土压力与墙体变形关系的协调变形计算方法^[2]; 第 3 类是有限单元方法, 如克拉夫和邓肯^[3]等建立的考虑土体实际应力-应变关系的有限元法。协调变形法和有限单元法考虑了土压力与墙体变位或土体变形的关系, 能够得到挡土墙工作过程中较为符合实际情况的土压力值。但是, 这类方法的计算模型和计算过程复杂, 计算精度取决于土体特性参数的选取, 而这些参数常常是较难确定的; 此外, 在实际工程应用中也广泛采用极限状态设计方法。因此, 基于

极限平衡理论的朗肯土压力理论和库仑土压力理论仍是实际工程中应用最为广泛的方法。

朗肯土压力理论建立了墙背光滑情况下的墙背水平土压力公式, 在不考虑挡土墙墙背同填土之间的摩擦角对土压力影响的情况下, 给出的土压力为线性分布; 库仑土压力理论只给出了土压力的合力, 在实际应用中假设土压力为线性分布。但大量的室内试验和现场观测结果表明, 墙背土压力为非线性分布。笔者在文献[4]中利用微分单元体在水平和竖直 2 个方向力的平衡条件, 建立了挡土墙土压力分布、土压力合力及合力作用点的理论公式, 其中的土侧压力系数假设为已知, 并认为其值介于主动土压力系数和静止土压力系数之间, 实际计算中取为静止土压力系数。本文在文献[4]的基础上, 进一步考虑微分单元体的力矩平衡条件, 从而给出了土侧

收稿日期: 2004-01-14

修改稿收到日期: 2004-03-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.50279027) 和天津市科技攻关基金资助项目 (No.043114711)。

作者简介: 王元战, 男, 1958 年生, 教授, 博士生导师, 主要从事港口、海岸与近海工程及土与结构相互作用领域的研究工作。

E-mail: yzwang@public.tpt.tj.cn

压力系数的计算公式,并建立了相应的土压力分布、土压力合力和土压力合力作用点高度的理论公式。

2 分析模型

参照文献[4],假设当挡土墙背离填土方向的位移达到一定量值时,墙后填土将沿墙背面和过墙基底与水平面夹角为 θ 的土体中某一平面 BC 发生滑动,这部分滑动土体称为滑动楔体 ABC ,并假定挡土墙上的土压力是由这部分土体引起的。从该滑动楔体中深度 y 处取一水平微分单元体,其厚度为 dy ,如图1(a)所示。作用于单元体上的力有单元体顶面的垂直压力 p_y ,底面垂直反力 p_y+dp_y ,挡土墙的水平反力 p_x ,挡土墙与墙后填土的摩擦力 τ_1 ,垂直于滑动面的不动土体反力 r ,不动土体对滑动楔体的摩擦力 τ_2 ,以及微分单元体的重力 dw ,如图1(b)所示。

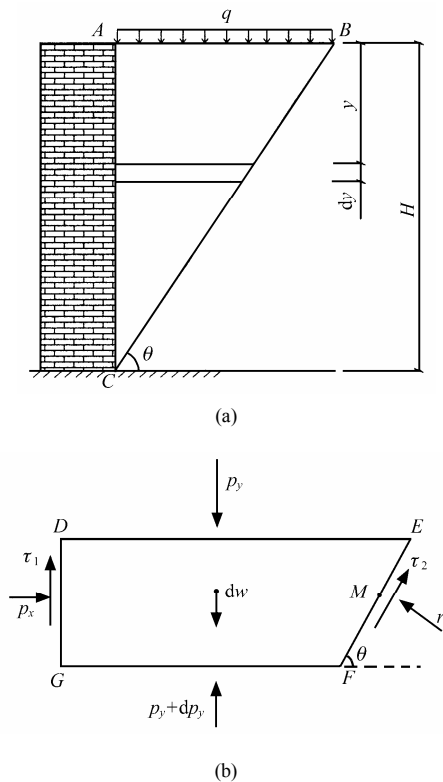


图1 分析模型
Fig.1 Analytic model

由作用于单元体上的水平方向力的平衡条件,可得

$$p_x + \tau_2 \cot \theta - r = 0 \quad (1)$$

由作用于单元体上的竖向力的平衡条件,可得

$$\frac{dp_y}{dy} = \gamma + \frac{1}{H-y} [p_y - r - (\tau_1 + \tau_2) \tan \theta] \quad (2)$$

由对 M 点(EF 的中点)的力矩平衡条件,可得

$$\frac{dp_y}{dy} = \gamma - \frac{2\tau_1 \tan \theta}{H-y} \quad (3)$$

对无粘性土,可令:

$$p_x = Kp_y, \quad \tau_1 = p_x \tan \delta, \quad \tau_2 = r \tan \varphi \quad (4)$$

式中 δ 为填土与墙背之间的摩擦角; φ 为填土内摩擦角; K 为土侧压力系数。

将式(4)代入式(1)和式(2),可得

$$\frac{dp_y}{dy} = \left[1 - \frac{\cos(\theta - \varphi - \delta) K \tan \theta}{\sin(\theta - \varphi) \cos \delta} \right] \frac{p_y}{H-y} + \gamma \quad (5)$$

再将式(4)代入式(3),可得

$$\frac{dp_y}{dy} = \gamma - \frac{2Kp_y \tan \delta \tan \theta}{H-y} \quad (6)$$

式(5)和式(6)即为本模型的基本方程。

3 基本方程的解

3.1 土侧压力系数

由式(5)和式(6)可求出土侧压力系数 K 为

$$K = \frac{\cos \theta \cos \delta \sin(\theta - \varphi)}{\sin \theta \cos(\theta - \varphi + \delta)} \quad (7)$$

3.2 土压力强度

在式(5)中,令:

$$\alpha = \frac{\cos(\theta - \varphi - \delta) \tan \theta}{\sin(\theta - \varphi) \cos \delta} \quad (8)$$

则求解式(5),可得

$$p_y = A(H-y)^{\alpha K-1} + \frac{\gamma}{\alpha K-2}(H-y) \quad (9)$$

式中 K 和 α 的值如式(7)和(8)所示, A 是积分常数,可以由边界条件确定,假设地面作用有均布荷载 q ,即 $y=0$ 时, $p_y=q$,则

$$A = \left(q - \frac{\gamma H}{\alpha K-2} \right) \frac{K}{H^{\alpha K-1}} \quad (10)$$

由式(4)中的 $p_x = Kp_y$,可得作用于挡土墙上的水平土压力为

$$p_x = K \left[\left(q - \frac{\gamma H}{\alpha K-2} \right) \left(\frac{H-y}{H} \right)^{\alpha K-1} + \frac{\gamma(H-y)}{\alpha K-2} \right] \quad (11)$$

3.3 土压力合力

将 p_x 沿墙高积分,可得土压力合力的水平分量 P_{tx} 为

$$P_{tx} = \frac{\sin(\theta - \varphi) \cos \delta \cos \theta}{\cos(\theta - \varphi - \delta) \sin \theta} \left(qH + \frac{1}{2} \gamma H^2 \right) \quad (12)$$

土压力合力为

$$P_t = \frac{P_{tx}}{\cos \delta} = \frac{\sin(\theta - \varphi) \cos \theta}{\cos(\theta - \varphi - \delta) \sin \theta} (qH + \frac{1}{2} \gamma H^2) \quad (13)$$

此处给出的土压力合力 P_t 与库仑理论完全相等。

3.4 土压力合力作用点

挡土墙墙背水平土压力合力作用点距墙底的距离为

$$H_p = \frac{\int_0^H (H-y)p_x dy}{P_{tx}} = \left[\frac{1}{3} + \frac{\alpha K - 1}{3(\alpha K + 1)} \right] H \frac{3q + \gamma H}{2q + \gamma H} \quad (14)$$

土压力线性分布假设时的土压力合力作用高度为

$$H_p = \frac{1}{3} H \frac{3q + \gamma H}{2q + \gamma H} \quad (15)$$

由式(7)和式(8),可得

$$\alpha K = \frac{\cos(\theta - \varphi - \delta)}{\cos(\theta - \varphi + \delta)} \quad (16)$$

若 $\delta > 0$, 则 $\alpha K > 1$, 由式(14)和式(15)可知, 本文给出的土压力合力作用点高度总是大于土压力线性分布假设时的土压力合力作用高度。

4 φ 和 δ 值对挡土墙土压力的影响

4.1 对侧向土压力系数 K 的影响

根据式(7)可作出土侧压力系数 K 随 φ 和 δ 的变化曲线, 如图2所示。由图可知, 在 δ 一定时, 土侧压力系数 K 随填土内摩擦角 φ 的增大而减小; 当 φ 一定时, K 随填土外摩擦角 δ 的增大而增大。

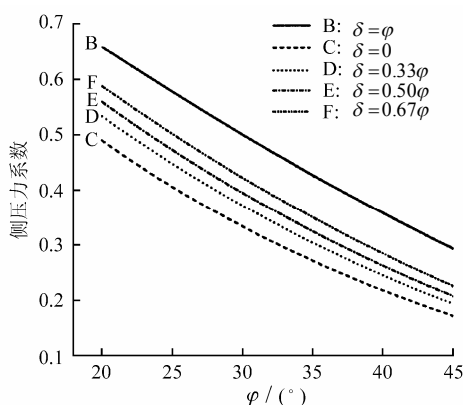


图2 K 值随 φ 和 δ 的变化曲线

Fig. 2 Relation curves between K and φ, δ

当 $\delta = 0$ 时, 在式(7)中取 $\theta = 45^\circ + \varphi/2$, 则可得

$$K_{\delta=0} = \frac{\cos \theta \sin(\theta - \varphi)}{\sin \theta \cos(\theta - \varphi)} = \tan^2(45^\circ - \frac{\varphi}{2}) \quad (17)$$

其值等于此时的库仑主动土压力系数。当 $\delta = \varphi$

时, 由式(7)可得

$$K_{\delta=\varphi} = \frac{\cos \varphi \sin(\theta - \varphi)}{\sin \theta} = 1 - \sin \varphi \quad (18)$$

此时土侧压力系数 K 等于静止土压力系数。

由图(2)及式(17)和式(18)可以看出: 挡土墙侧向土压力系数 K 介于静止土压力系数 K_0 和主动土压力系数 K_a 之间。

4.2 对水平土压力分布的影响

由式(11)可确定水平土压力 p_x , 图3是在 $H = 8.0$ m, $\gamma = 18$ kN/m³, $q = 0$ 的情况(下同)下得出的一组 p_x 分布随 φ 和 δ 的变化关系曲线。由图3可以看出, 在 δ 一定时, 随着 φ 的增大, 水平土压力值减小; 在 φ 一定时, 随着 δ 的减小, 水平土压力的值增大, 形心下移。

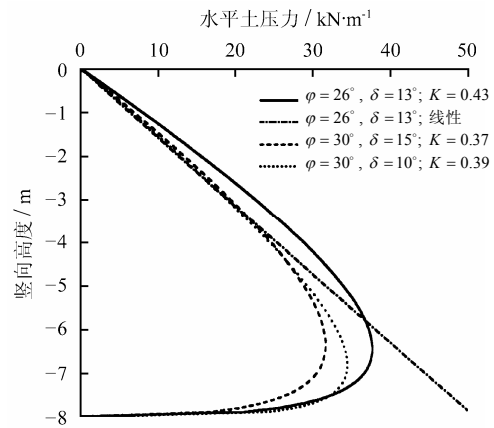


图3 不同 φ 和 δ 时的土压力分布

Fig. 3 Distribution of earth pressure with different φ and δ

4.3 对水平土压力合力的影响

水平土压力合力由式(12)确定。图4给出了水平土压力合力 P_{tx} 随 φ 和 δ 的变化曲线。由图可知, 水平土压力合力随 φ 和 δ 的增大而减小。

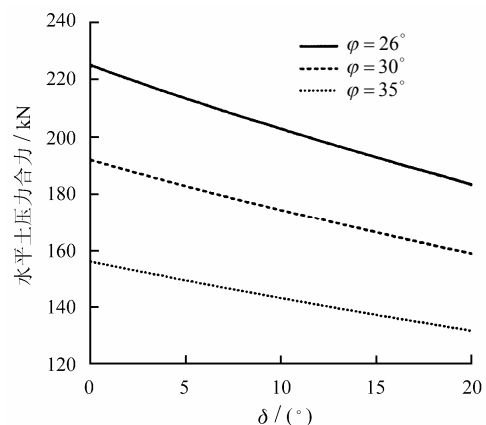


图4 水平土压力合力随 φ 和 δ 的变化

Fig. 4 Relation curves between the resultant horizontal earth pressure and φ, δ

4.4 对土压力合力作用点高度的影响

土压力合力作用点高度 H_p 由式 (14) 计算, 图 5 给出了一组 $q=0$ 时, H_p 随 φ 和 δ 变化的曲线。合力作用点高度 H_p 随 φ 的增大而减小, 随 δ 的增大而增大。当 $\delta=0$ 时, $H_p=0.33H$, 也就是说, 在墙背光滑的情况下, 本模型得到的水平土压力合力作用点高度和线性分布时的结果是一致的。

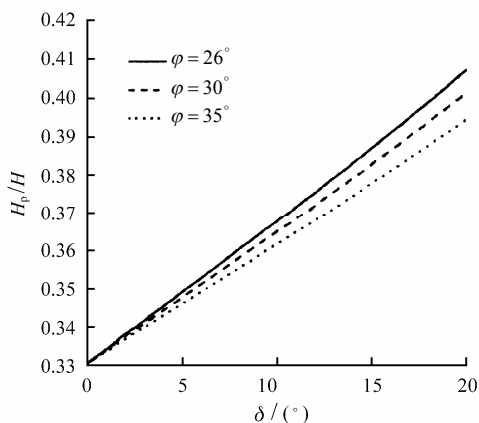


图 5 合力作用点高度随 δ 变化的关系曲线

Fig. 5 Relation curves between the height of action line of resultant earth pressure and δ

4.5 对墙体抗倾覆稳定性的影响

土压力合力对墙底的力矩为

$$M_x = H_p P_{tx} = \frac{1}{3} \tan(\theta - \varphi) \cot \theta (qH + \frac{1}{2} \gamma H^2) H \frac{3q + \gamma H}{2q + \gamma H} \quad (19)$$

由式 (19) 可知, 土压力合力对墙底的力矩与 K 和 δ 无关; 随着填土内摩擦角 φ 的增大, 土压力合力对墙底的倾覆力矩减小。为分析 δ 对挡土墙底部抗倾覆稳定性的影响, 在此引进系数 f_m , 将其定义为填土同墙背之间的摩擦力对墙底前趾产生的稳定力矩与水平合力对墙底的倾覆力矩的比值, 称其为自稳定系数。假设挡土墙底宽 2.0 m, 则

$$f_m = \frac{2P_{tx} \tan \delta}{H_p P_{tx}} = \frac{3 \sin \delta \cos(\theta - \varphi)}{4 \cos(\theta - \varphi - \delta)} \quad (20)$$

图 6 给出了 f_m 随 φ 和 δ 的变化曲线。从图中可以看出, δ 增大, 可以明显提高 f_m 的值, 即增加墙体的稳定性。

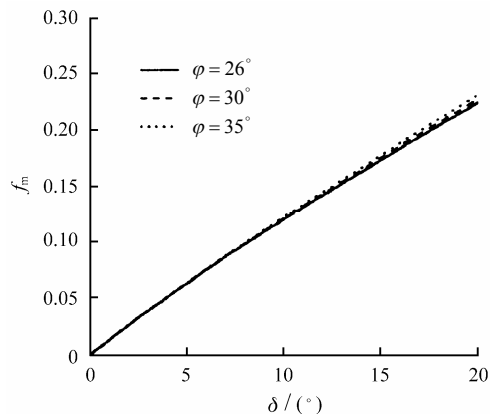


图 6 f_m 随 δ 的变化曲线

Fig. 6 Relation curves between f_m and δ

5 结 语

本文利用力矩平衡条件给出了土侧压力系数的计算公式。土侧压力系数是填土内摩擦角和填土与墙背之间的摩擦角的函数, 其值介于主动土压力系数和静止土压力系数之间。

随着填土同墙背间的摩擦角 δ 增大, 土侧压力系数 K 值和土压力合力作用点高度增大, 但土压力合力减小, 使土压力合力对墙底的合力矩保持不变。但是, 随着填土同墙背间的摩擦角 δ 增大, 可明显增加土压力合力对墙背的竖向摩擦力, 有利于挡土墙的抗倾稳定性。

参 考 文 献

- [1] 陈希哲. 土力学地基基础[M]. 北京: 清华大学出版社, 1998. 175—188.
- [2] 梅国雄, 宰金珉, 徐建. 考虑变形与时间效应的土压力计算方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(增 1): 1 079—1 082.
MEI Guo-xiong, ZAI Jin-min, XU Jian. Earth pressure computing method placement and time effect[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2001, 20(supp.1): 1 079—1 082.
- [3] 顾慰慈. 挡土墙土压力计算[M]. 北京: 中国建材工业出版社, 2001. 373—378.
- [4] WANG Y Z. Distribution of earth pressure on a retaining wall[J]. *Geotechnique*, 2000, 50(1): 83—88.