

考虑土拱效应挡土墙绕墙底转动的主动土压力

张永兴, 陈 林

(重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045)

摘要:采用库仑土压力理论的假设,通过研究刚性挡墙绕墙底转动极限状态土体内主应力拱形状,计算了土层平均竖向应力和剪应力,得到了对应于不同内摩擦角和墙土摩擦角的侧土压力系数和水平摩擦系数的理论公式。将其用于水平微分单元法求解挡墙绕墙底转动时的主动土压力,得到了挡土墙主动土压力强度、土压力合力和合力作用点的理论公式,分析了填土内摩擦角和墙土摩擦角对土侧压力系数、水平摩擦系数、土压力强度、土压力合力、土压力合力作用点的影响,并与模型试验数据进行了比较。

关键词:土压力;剪应力;土拱;绕墙底转动

中图分类号:TU457 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2010)03-0046-07

Active Earth Pressure with Wall Rotation Movement about Base Considering Soil Arching

ZHANG Yong-xing, CHEN Lin

(College of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China)

Abstract:Based on coulomb's theory and the study on the shape of the principal stress arching in limiting state soil behind the rigid retaining wall with the rotation about base, the horizontally earth pressure factor and the horizontal friction coefficients were calculated for different friction angle of soil and friction angle between wall-surface and soil to study the vertical stress and shear stress. And the theoretical formulas were obtained for the active earth pressures, the resultant earth pressures and the points of application of resultant earth pressures. The effects of the internal frictional angle of backfill and the frictional angle between the wall back and the backfill on several parameters were investigated, which included the lateral coefficient of earth pressure, the horizontal friction coefficients, 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. And the formula proposed was compared with some experimental observations. And it is found that the results are in good agreement.

Key words:earth pressure; shear stress; soil arching; movement mode of rotation about base

挡土墙是一种常见的支挡结构,墙背土压力的取值问题一直备受工程技术人员的关注。通常情况下,土压力的计算多采用朗肯土压力与库伦土压力

理论,因其计算简单和力学概念明确得到工程界认可并广泛应用到实际设计中^[1]。值得注意的是,部分学者通过试验证实挡土墙墙背实际土压力并非呈

收稿日期:2009-12-23

基金项目:国家自然科学基金(50878218);国家杰出青年科学基金(50625824);“十一五”国家科技支撑计划课题子题(2008BAJ06B04);国务院三峡办移民安置规划司资助项目(2008SXG02-2)

作者简介:张永兴(1961-),男,博士,教授,博士生导师,主要从事地下工程、边坡工程防灾减灾方面的研究,
(E-mail)cqyxzhang@163.com。

线性分布^[2]。Terzaghi 最早通过大规模的模型试验指出,只有当土体水平位移达到一定值,土体产生剪切破坏时,库伦土压力值才是正确的^[3-4]。土拱效应是岩土工程中一种常见的现象,比如墙体绕墙底转动过程中,由于土拱效应使得土压力呈显著的非线性分布。在墙后土体处于极限平衡状态时,可以认为各土层相对于其相邻土层产生相对运动趋势,土体内的主应力发生旋转,导致水平方向产生剪应力,形成显著的土拱效应,从而导致主土压力呈显著非线性分布^[5]。Paik^[6]、Thomas^[7]、Shubhra^[8]、应宏伟^[9]基于土拱效应原理建立了平动模式下的侧压力系数及土压力强度的计算方法;樊玲根据土拱效应原理,按库伦滑裂面建立了刚性挡墙绕墙顶转动时土压力强度计算方法^[10],但其未能建立刚性挡墙绕墙底转动时土压力计算方法,并且在分析刚性挡墙绕墙顶转动时的应力状态时未能充分考虑土体的实际应力拱形状及位置。王元战^[11]通过对库伦滑裂面上水平土层单元的静力平衡条件进行分析,假设水平土层的竖向应力及剪应力呈均匀分布,建立了墙后土压力的计算方法,但欠缺考虑墙后土体的土拱效应,并且利用了水平微分单元体的力矩平衡条件来求解,而实际上由于薄层单元上下面的较长,不能把压力强度看作均布应力,即无法确定薄层单元上下面上合力的作用点,也就不能给出力矩平衡方程。由此可见,目前墙体绕墙底转动变位模式下挡墙土压力理论和计算方法普遍欠缺对墙后滑裂土体的实际应力状态的充分分析;只考虑墙后滑裂土体的静力平衡或应力状态的某一方面,忽略墙后土体的静力平衡与主应力偏转、水平土层间剪应力的相关性。

总结发现,如何将挡土墙墙后土体的应力状态和静力平衡统一起来进行分析仍有待深入。在总结前人研究成果的基础上,将小主应力拱悬链线近似为抛物线^[8-9],如图 1 所示,墙后土体的滑裂面为平面,沿水平向主应力发生偏转,主应力大小不变,偏转角由墙面处的最大值逐渐减小到滑裂面处为零,小主应力轨迹从墙面到滑裂面形成半个土拱,滑裂面为小主应力拱的拱顶面。考虑墙土摩擦角对挡土墙后土体滑裂面倾角的影响,根据土拱形状计算平均竖向应力和剪应力,由此得到了对应不同内摩擦角和墙土摩擦角的侧压力系数和水平摩擦系数,将其用于微分单元法求解墙体绕墙底转动变位模式下的挡土墙主动土压力,得到了挡土墙主动土压力的分布、土压力合力和合力作用点的理论公式,并与模型试验数据进行比较分析。

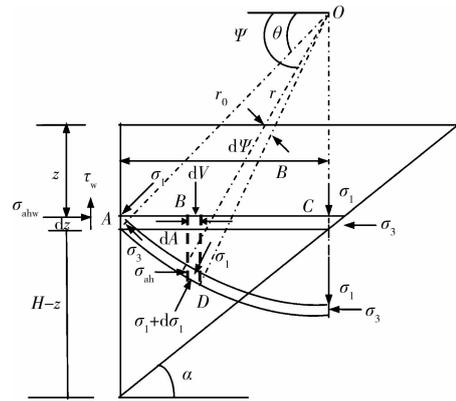


图 1 刚性挡土墙间的小主应力拱^[4]

1 小主应力拱与平面滑裂面

1.1 应力拱在墙背处切线与垂直方向夹角确定

墙体绕墙底转动向背离土体方向产生足够大位移时,挡墙后土体达到极限平衡状态,由于挡土墙表面存在摩擦力,土体单元的大、小主应力方向将会发生变化,如图 1 所示。应力拱在挡土墙上 A 点的切线与垂直方向的夹角 θ 可由下式计算得到^[14]

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

式中: N 为大小主应力比,由土力学强度理论可知, $N = \frac{\sigma_1}{\sigma_3} = \tan^2(45^\circ + \frac{\varphi}{2})$; φ 为挡土墙后土体的内摩擦角; δ 为墙土摩擦角。

1.2 挡土墙后土体滑裂面倾角的确定

假定挡土墙墙背直立,墙后填土面水平,挡墙后土体处于主动极限平衡状态时,库伦土压力理论假定土体内出现三角形滑动楔体,滑裂面倾角 α 可表示为^[15]

$$\alpha = \arctan \left(\sqrt{\tan^2 \varphi + \frac{\tan \varphi}{\tan(\varphi + \delta)} + \tan \varphi} \right) \quad (2)$$

2 挡土墙主动土压力

2.1 挡土墙侧土压力系数

图 1 为平面滑裂面挡土墙后水平微分单元法分析模型,由抛物线形拱的几何形状^[6]可知

$$r = \frac{2\beta}{1 - \cos \Psi} \quad (3)$$

式中: β 为抛物线形拱的形状参数; Ψ 为应力拱切线与垂直方向夹角,如图 1 所示。

由图中可知深度 z 处的土体单元的长度为

$$B_z = r_0 \cos \theta \quad (4)$$

式中: r_0 为 A 点的最小主应力拱半径; θ 为应力拱在

A 点的切线与垂直方向的夹角。

水平微分单元土体受力如图 2 所示,由图中土体单元垂直方向力的平衡条件可知,微分单元体在垂直方向受竖向应力 σ_v 作用,微分单元部分垂直作用力 dV 为

$$dV = \sigma_v dA = \sigma_1 \left(\sin^2 \Psi + \frac{\cos^2 \Psi}{N} \right) (rd \Psi \sin \Psi) \quad (5)$$

式中: $r = \frac{2\beta}{1 - \cos \Psi}$; dA 为土体单元宽度。

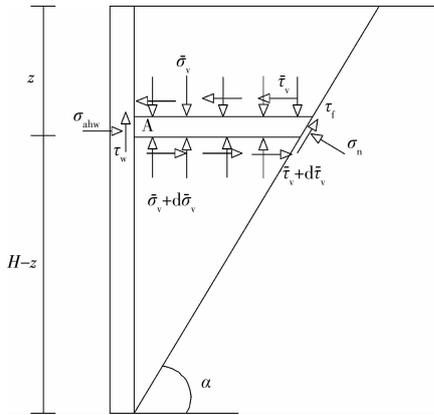


图 2 平面滑裂面水平微分单元土体受力图

深度 z 处土体单元平均垂直应力 $\bar{\sigma}_v$ 为

$$\bar{\sigma}_v = \frac{V}{B_z} = \int_{\theta}^{\frac{\pi}{2}} \frac{dV}{B_z} \quad (6)$$

式中: V 为水平微分单元体所受垂直方向总的作用力; $B_z = r_0 \cos \theta$; $r_0 = \frac{2\beta}{1 - \cos \theta}$

将式(5)代入上式并积分可得

$$A = 1 + 0.5 \cos \theta - \frac{1}{N} (1 + 0.5 \cos \theta + \frac{\ln(1 - \cos \theta)}{\cos \theta}) \bar{\sigma}_v = A \sigma_1 (1 - \cos \theta) \quad (7)$$

则主动土压力系数 K_n 可由上式计算为

$$K_n = \frac{\sigma_{ahw}}{\sigma_v} = \frac{\left[\cos^2 \theta + \left(\frac{1}{N} \right) \sin^2 \theta \right]}{A (1 - \cos \theta)} \quad (8)$$

式中 σ_{ahw} 为墙背正应力, $\sigma_{ahw} = \sigma_1 \cos^2 \theta + \sigma_3 \sin^2 \theta$ 。

2.2 土层间剪应力计算

由一点的应力状态,作用在微分单元体的剪应力为

$$\tau_v = (\sigma_1 - \sigma_3) \cos \Psi \sin \Psi \quad (9)$$

式中: Ψ 为应力拱上 D 点的切线与垂直方向的夹角,如图 1 所示。

水平微分单元土体受力如图 2 所示,由图中土体单元水平方向平衡条件可知,微分单元部分在水平方向受 τ_v 和墙土摩擦力 σ_{ahw} 作用。微分单元部分水平作用力 dQ 为

$$dQ = \tau_v dA = \sigma_1 \left(1 - \frac{1}{N} \right) \sin \Psi \cos \Psi (rd \Psi \sin \Psi) \quad (10)$$

式中: $r = \frac{2\beta}{1 - \cos \Psi}$; dA 为土体单元宽度。

深度 z 处土体单元平均水平剪应力 $\bar{\tau}_v$ 为

$$\bar{\tau}_v = \frac{Q}{B_z} = \int_{\theta}^{\frac{\pi}{2}} \frac{dQ}{B_z} \quad (11)$$

式中: Q 为水平微分单元体所受水平方向总的作用力; $B_z = r_0 \cos \theta$; $r_0 = \frac{2\beta}{1 - \cos \theta}$ 。

将式(10)代入上式并积分上式可得

$$B = (1 - \cos \theta) (1 - \sin \theta + 0.5(\pi/2 - \theta) - 0.25 \sin 2\theta) / \cos \theta$$

$$\bar{\tau}_v = B \sigma_1 (1 - 1/N) \quad (12)$$

则水平摩擦系数 K_h , 可表示为

$$K_h = \frac{\bar{\tau}_v}{\sigma_v} = \frac{B \left(1 - \frac{1}{N} \right)}{A (1 - \cos \theta)} \quad (13)$$

式中, A 、 B 由式(7)、(12) 确定。

2.3 基本方程的建立

如图 2 所示,在距楔体表面距离为 z 处取厚度为 dz 的水平微分单元, $\bar{\sigma}_v$ 为作用于微分单元顶面平均竖向应力, $\bar{\sigma}_v + d\bar{\sigma}_v$ 为作用于单元底面平均竖向应力; σ_{ahw} 为挡土墙背正应力, $\sigma_{ahw} = \bar{\sigma}_v K_n$; τ_w 为挡土墙背剪应力, $\tau_w = \sigma_{ahw} \tan \delta = \bar{\sigma}_v K_n \tan \delta$; $\bar{\tau}_v$ 为作用于单元底面平均剪应力, $\bar{\tau}_v = \bar{\sigma}_v K_h$; dW 为水平微分单元重力。

由土体单元垂直方向平衡条件可得

$$d\bar{\sigma}_v B_z + \tau_w dz + \bar{\sigma}_v dB_z + (\tau_f + \sigma_n \cot \alpha) dz = \gamma B_z dz \quad (14)$$

式中: τ_f 为滑裂面处剪应力, $\tau_f = \sigma_n \tan \varphi$; σ_n 为滑裂面处正应力; K_n 为主动土压力系数; γ 为土的容重; α 为滑裂面倾角; B_z 为土条宽度, $B_z = \frac{H-z}{\tan \alpha}$ 。

水平方向平衡条件为

$$d\bar{\tau}_v B_z + \tau_v dB_z + \sigma_{ahw} dz + (\tau_f \cot \alpha - \sigma_n) dz = 0 \quad (15)$$

联立式(14)、(15) 消去 σ_n 整理得到

$$\frac{d\bar{\sigma}_v}{dz} - \frac{K \bar{\sigma}_v}{H-z} = C \quad (16)$$

式中:

$$C = \frac{\gamma}{1 + K_h \cot(\alpha - \varphi)};$$

$$K = 1 - \frac{K_n (\tan \delta + \cot(\alpha - \varphi))}{\cot \alpha + K_h \cot(\alpha - \varphi) \cot \alpha}.$$

式(16) 即为求解挡土墙主动土压力分布的基

本方程,当满足边界条件 $z = 0$ 时 $\bar{\sigma}_v = 0$,存在

$$\bar{\sigma}_v = \frac{CH}{1+K} \left(\left(\frac{H-z}{H} \right)^{-K} - \left(\frac{H-z}{H} \right) \right) \quad (17)$$

式中: H 为挡土墙的高度。

由 $\sigma_{ahw} = K_n \bar{\sigma}_v$ 得则作用在挡土墙上的正应力为

$$\sigma_{ahw} = K_n \bar{\sigma}_v = \frac{K_n CH}{1+K} \left(\left(\frac{H-z}{H} \right)^{-K} - \left(\frac{H-z}{H} \right) \right) \quad (18)$$

2.4 土压力的合力及作用点

土压力合力为

$$P = \int_0^H \frac{\sigma_{ahw}}{\cos \delta} dz = \frac{1}{2} \frac{\sin(\alpha - \varphi)}{\cos(\alpha - \varphi - \delta)} \frac{\cos \alpha}{\sin \alpha} \gamma H^2 \quad (19)$$

此处给出的土压力合力 P 与平移模式下按库仑理论计算的主动土压力完全相等,说明挡土墙的位移模式不会影响挡土墙主动土压力大小。这是因为挡土墙绕墙底转动时只是土体内部应力状态与平移模式不同,而整个土体的应力状态与平移模式无差别。

将式(2)所求破裂角 α 代入上式可得动主土压力 P 为

$$P = \frac{1}{2} K_n \gamma H^2 = \frac{\cos^2 \varphi}{\cos \delta \left[1 + \sqrt{\frac{\sin(\delta + \varphi) \sin \varphi}{\cos \delta}} \right]^2} \frac{1}{2} \gamma H^2 \quad (20)$$

式中: K_n 为库仑土压力系数。

挡土墙背水平土压力合力作用点距墙底的距离为

$$h = \frac{\int_0^H (H-y) \sigma_{ahw} dy}{\int_0^H \sigma_{ahw} dz} = \left[\frac{1}{3} + \frac{K}{3(K+2)} \right] H \quad (21)$$

3 φ 和 δ 值的影响分析

3.1 对侧向土压力系数 K_n 的影响

目前确定刚性挡墙绕墙底转动模式下侧向土压力系数的方法主要是按静止土压力系数近似取值, $K_n = 1 - \sin \varphi$, 由于静止土压力系数是墙后土体处于静止状态时求得的, 并且与墙土摩擦角 δ 无关, 所以此时并不满足刚性挡墙绕墙底转动时的变形条件; 根据式(8)可得计算刚性挡墙侧土压力系数 K_n ; 图 3 为计算侧向土压力系数与按静止土压力系数近似计算的侧向土压力系数 K_n 随 φ 和 δ 的变化曲面, 图中角度均采用弧度制。由图 3 曲面 b 可知, 土侧压力系数 K_n 随填土内摩擦角 φ 的增大而减小; 随填土与墙背间摩擦角 δ 的增大而增大, 此变化规律与平

动模式^[11] 以及绕墙顶转动模式^[16] 下的挡土墙侧向土压力系数分析结果相同, 据此说明挡土墙的位移模式不会影响挡土墙侧向土压力系数随填土内摩擦角 φ 、墙背间摩擦角 δ 的变化规律。从图中可以看出式(8)计算的侧向土压力系数 K_n 要比静止土压力系数小, 说明一般的计算方法过高地估计了侧向土压力系数, 这样势必使挡土墙侧压力过大, 使挡土墙设计偏于保守。

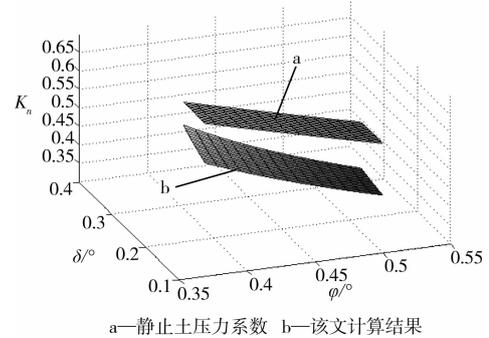


图 3 K_n 值随 φ 和 δ 的变化曲面

3.2 对水平摩擦系数 K_h 的影响

目前确定刚性挡墙绕墙底转动模式下水平摩擦系数 K_h 的方法主要是按填土的内摩擦系数近似取值, $K_h = \tan \varphi$, 由于填土的内摩擦系数是在土层之间产生相对滑动情况下产生的, 并且它与墙土摩擦角 δ 无关, 但刚性挡墙绕墙底转动时的土层之间只是由相对滑动趋势, 并没有滑动, 所以此时并不满足刚性挡墙绕墙底转动时的土层之间的应力条件; 根据式(13)可得计算水平摩擦系数 K_h , 经比较此时计算的水平摩擦系数 K_h 要比填土的内摩擦系数小, 所以一般的计算方法在计算挡土墙绕墙底转动模式下过高的估计了剪应力作用。图 4 为计算水平摩擦系数 K_h 随 φ 和 δ 的变化曲线。由图 4 可以看出, 内摩擦角 φ 取定值时, 水平摩擦系数 K_h 随墙土摩擦角 δ 增大而增大, 并且此时土拱效应越显著; 随填土内摩擦角 φ 的增大先增大后减小。

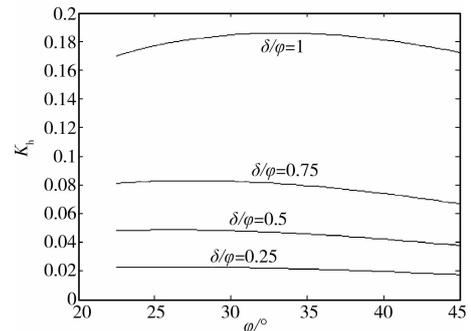


图 4 K_h 值随 φ 和 δ 的变化曲面

3.3 对水平土压力分布的影响

尽管按水平层分析法得出了和库伦理论完全相同的土压力合力表达式,但式(18)表明其分布形式不是线性的,且填土摩擦角 φ 和墙土摩擦角 δ 对此有很大影响。图5、图6是在 $H = 4.0 \text{ m}$, $\gamma = 18 \text{ kN/m}^2$ 的情况下得出的一组 σ_{ahw} 分布随 φ 或 δ 的变化关系曲面。由图5可以看出,在 $\delta = 20^\circ$ 时,土压力分布主要集中在挡土墙墙底;水平土压力强度 σ_{ahw} 最大值位于墙底,随着 φ 的增大,水平土压力强度 σ_{ahw} 最大值先增大后逐渐减小,同时靠近墙底的局部范围内土压力强度 σ_{ahw} 相对随之先增大后逐渐减小,靠近墙顶的局部范围内土压力强度 σ_{ahw} 相对随之减小。

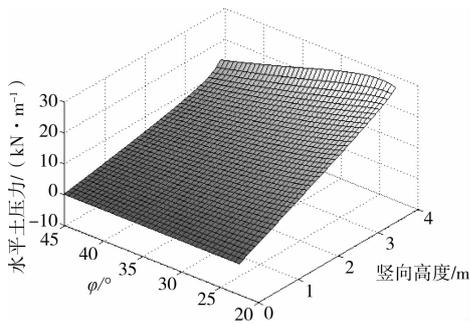


图5 δ 不变时不同 φ 的土压力分布

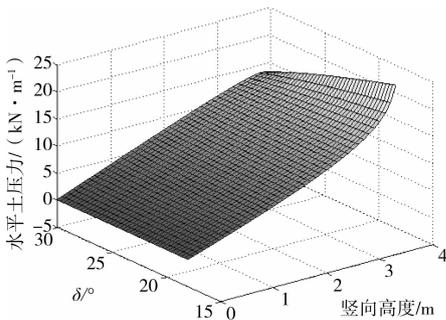


图6 φ 不变时不同 δ 的土压力分布

由图6可知,在 $\varphi = 30^\circ$ 时,土压力分布主要集中在挡土墙墙底;水平土压力强度 σ_{ahw} 最大值位于墙底,随着 δ 的增大,水平土压力强度 σ_{ahw} 最大值逐渐减小,同时靠近墙底的局部范围内土压力强度 σ_{ahw} 相对随之减小,靠近墙顶的局部范围内土压力强度 σ_{ahw} 相对随之增大。比较图5、图6可以看出挡土墙绕墙底转动模式下土压力分布是开口曲线,与王元战^[17]分析相同,并且 φ 的变化对土压力的大小和分布比较敏感。

3.4 对主动土压力系数的影响

土压力合力由式(20)确定,其值取决于主动土压力系数 K_a ,图7给出了水平土压力合力随 φ 和 δ 的变化曲面。由图可知,土压力合力随 φ 和 δ 的增大而减小。

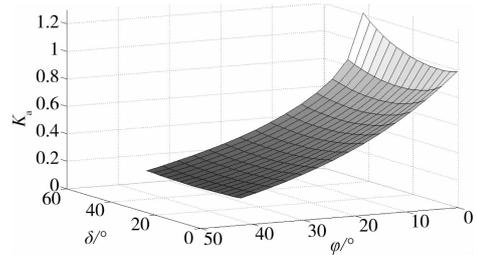
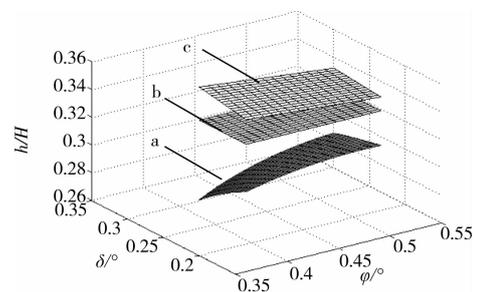


图7 主动土压力系数 K_a 随 φ 和 δ 的变化

3.5 对土压力合力作用点的影响

线性分布土压力,土压力合力作用点距墙底高度 $h = \frac{H}{3}$ 。公式给出的土压强度,土压力合力作用点距墙底高度由式(21)给出。图8给出了墙体水平变位和墙体绕墙底转动变位模式下,土压力合力作用点与墙高的比值随土内摩擦角的变化曲线。在墙体水平变位模式下,如图8曲面c所示,土压力合力作用点在距墙底约(0.346 ~ 0.357)倍墙高处,线性分布土压力假设给出的土压力合力作用点在距墙底1/3倍墙高处,如图8曲面b所示;由图8曲面a可知,在墙体绕墙底转动变位模式下土压力合力作用点比墙体水平变位模式下土压力合力作用点低,约在距墙底0.275 ~ 0.30倍墙高处;合力作用点高度随 δ 的增大而减小;随着 φ 的增大先增大后减小,并且合力作用点都在墙高的1/3以下。在墙体绕墙底转动变位模式下,文中公式给出的土压力合力作用点与Fang^[18]的实验结果相吻合,实验结果为 $h = (0.276 \sim 0.30)H$ 。



a—绕墙底转动变位模式 b—墙高1/3 c—水平变位模式

图8 土压力合力作用点高度 h 随 φ 和 δ 的变化

3.6 对挡土墙倾覆力矩的影响

对挡土墙墙底取矩,则挡土墙倾覆力矩 T 为

$$T = Ph \quad (22)$$

将式(19)、(21)代入上式即可得挡墙倾覆力矩 T 。

目前确定刚性挡墙绕墙底转动模式下挡土墙倾覆力矩的方法主要是按库伦理论近似取值——土压力合力为库伦土压力,合力作用点距墙底高度为墙

高 1/3。图 9 给出了墙体水平变位、墙体绕墙底转动和目前近似计算方法倾覆力矩 T 随 φ 和 δ 变化的曲面。由图可知,倾覆力矩 T 随墙后土体内摩擦角 φ 的增大而减小;随墙土摩擦系数 δ 的增大而减小。从图中可以看出,土体内摩擦角 φ 的增大或者 δ 的增大都可以增加墙体的稳定性。从图中曲面 a、b 可以看出式(22) 计算的倾覆力矩 T 要比目前近似计算方法倾覆力矩小,说明一般的近似计算方法过高地估计了挡土墙倾覆力矩,使挡土墙设计偏于保守。比较曲面 a、c 可知式(22) 计算的倾覆力矩 T 要比水平变位模式下倾覆力矩小,说明绕墙底转动模式下的合力主要集中在墙底,这与 3.3 分析结果相同。

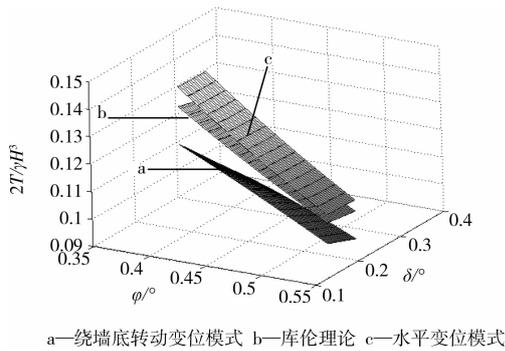


图 9 倾覆力矩 T 随 φ 和 δ 的变化

4 实例分析

依据布嘎耶夫在敖德萨海运工程学院实验室内进行的挡土墙土压力试验^[19]:墙背填土为海砂,天然容重 $\gamma = 17 \text{ kN/m}^3$,内摩擦角 $\varphi = 35^\circ$,土与墙间摩擦角 $\delta = 15^\circ$,挡土墙高度 $H = 1.09 \text{ m}$ 。便于对比,将该文计算方法计算值与上述实测值一起列出,结果如图 10 所示。

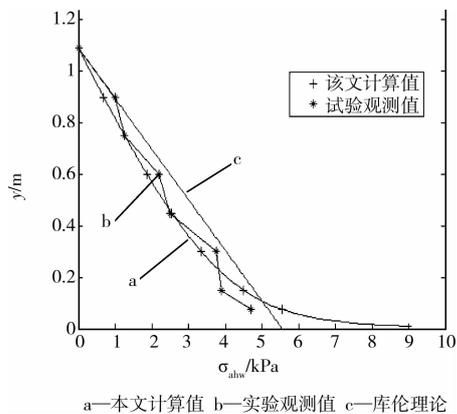


图 10 本文方法土压力与试验数据及其他土压力理论比较

由图 10 曲线 a、b 可知,采用该文的计算方法,土压力分析结果与实测值的变化规律一致,数值大

小均与实测结果吻合较好;由图中曲线 b、c 可知,库伦土压力在墙顶范围内与实测结果吻合较好,在墙底范围内产生较大偏差。从图中可以看出,挡土墙主动土压力的分布图为曲线形并非如直线 c 所示线形;在墙顶和墙角处横坐标值均为 0,并非如直线 c 所示墙底土压力值;挡土墙主动土压力作用中心和土压力最大值计算值与试验值也非常吻合,土压力最大值作用点高度位于墙底局部范围内,并非如直线 c 所示土压力最大值在墙底。由于在墙体中、下部受到初始静止土压力的影响,致使土压力计算值与试验结果产生偏差。

5 结论

考虑挡土墙绕墙底模式下墙后土体主应力偏转和剪应力作用,对墙后土体的应力状态进行分析,考虑水平土层间剪应力作用,考虑了墙土摩擦角对墙后土体的应力状态、土中剪应力和主应力偏转影响,计算得到挡土墙主动土压力强度、土压力合力大小和合力作用点位置的理论公式,分析了墙土摩擦角 δ 和填土摩擦角 φ 对土侧压力系数、水平摩擦系数、土压力强度、土压力合力、土压力合力作用点的影响,并与模型试验结果进行比较,得到如下结论:

1) 挡土墙墙后土体发生主应力偏转,其水平土层存有剪应力作用,这在以往的挡土墙土拱效应分析未能考虑的。

2) 土侧压力系数 K_a 随填土内摩擦角 φ 的增大而减小;随填土与墙背间摩擦角 δ 的增大而增大。一般的计算方法过高地估计了侧向土压力系数,使挡土墙设计偏于保守。水平摩擦系数 K_h 比填土的内摩擦系数小,一般的计算方法在计算挡土墙绕墙底转动模式下过高的估计了剪应力作用。内摩擦角 φ 取定值时,水平摩擦系数 K_h 随墙土摩擦角 δ 增大而增大,并且此时土拱效应越显著;随填土内摩擦角 φ 的增大先增大后减小。

3) 挡土墙水平土压力分布主要集中在挡土墙墙底,土压力强度 σ_{ahw} 最大值位于墙底。墙土摩擦角 δ 一定时,随着 φ 的增大,水平土压力强度 σ_{ahw} 最大值先增大后逐渐减小,同时靠近墙底的局部范围内土压力强度 σ_{ahw} 相对随之先增大后逐渐减小,靠近墙顶局部范围内土压力强度 σ_{ahw} 相对随之减小。土摩擦角 φ 一定时,随着 δ 的增大,水平土压力强度 σ_{ahw} 最大值逐渐减小,同时靠近墙底的局部范围内土压力强度 σ_{ahw} 相对随之减小,靠近墙顶局部范围内土压力强度 σ_{ahw} 相对随之增大。

4) 合力作用点高度随 δ 的增大而减小;随着 φ 的增大先增大后减小,并且合力作用点都在墙高的 1/3 以下,小于水平变位模式下合力作用点高度。倾

覆力矩 T 随墙后土体内摩擦角 φ 的增大而减小; 随墙土摩擦系数 δ 的增大而减小; 比目前的近似计算方法计算的倾覆力矩小, 说明近似计算方法过高地估计了挡土墙倾覆力矩, 使挡土墙设计偏于保守。

参考文献:

- [1] 黄求顺, 张四平, 胡岱文. 边坡工程[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 2003.
- [2] ZHANG MENG-XI, ZHOU HUAI. Model test on sand retaining wall reinforced with dentistrip inclusions [J]. Science in China Series E: Technological Sciences, 2008, 51(12): 2269-2279.
- [3] VILLEMUS B, MOREL JC, BOUTIN C. Experimental assessment of dry stone retaining wall stability on a rigid foundation [J]. Engineering Structures, 2007, 29: 2124-2132.
- [4] WANG JUN-JIE, LIU FU-CHEN, JI CHUN-LOU. Influence of drainage condition on Coulomb-type active earth pressure [J]. Soil Mechanics and Foundation Engineering, 2008, 45(5): 161-167.
- [5] 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.
- [6] PAIK K H, SALGADO R. Estimation of active earth pressure against rigid retaining walls considering arching effect [J]. Geotechnique, 2003, 53(7): 643-653.
- [7] THOMAS CARONLINE J, SHIAU JIM S. Modeling the arching effect in active earth pressure problems [C]//10th Australia New Zealand Conference on Geomechanics, 21-24 Oct, 2007, Brisbane, Australia.
- [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, 2: 123-133.
- [9] 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(1): 717-722.
- [10] 樊玲, 彭述权. 考虑土拱效应绕墙顶转动刚性挡墙土压力分布[J]. 扬州职业大学学报, 2006, 10(4): 39-44. FAN LING, PENG SHU-QUAN. Distribution of earth pressure of retaining wall with wall movement of rotation about top considering soil arching [J]. Journal of Yangzhou Polytechnic College, 2006, 10(4): 39-44.
- [11] 王元战, 李新国, 陈楠楠. 挡土墙主动土压力分布与侧压力系数[J]. 岩土力学, 2005, 26(7): 1019-1022. WANG YUAN-ZHAN, LI XIN-GUO, CHEN NAN-NAN. Active earth pressure on a retaining wall and lateral coefficient of earth pressure [J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(7): 1019-1022.
- [12] 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.
- [13] 章瑞文, 徐日庆, 郭印. 挡土墙墙后土体应力状态及土压力分布研究[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2008, 42(1): 111-115. ZHANG RUI-WEN, XU RI-QING, GUO YIN. Study on soil stress state and earth pressure distribution behind retaining wall [J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2008, 42(1): 111-115.
- [14] 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.
- [15] 章瑞文, 徐日庆. 土拱效应原理求解挡土墙土压力方法的改进[J]. 岩土力学, 2008, 29(4): 1057-1066. ZHANG RUI-WEN, XU RI-QING. Solution of problem of earth pressure on retaining wall calculated by method of soil arching effect [J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(4): 1057-1066.
- [16] 王元战, 唐照评, 郑斌. 墙体绕墙顶转动情况下挡土墙主动土压力分布[J]. 应用数学和力学, 2004, 25(7): 698-700. WANG YUAN-ZHAN, TANG ZHAO-PING, ZHENG BIN. Distribution of active earth pressure of retaining wall with wall movement of rotation about top [J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2004, 25(7): 698-700.
- [17] 王元战, 李蔚, 黄长虹. 墙体绕基础转动情况下挡土墙主动土压力分布[J]. 岩土工程学报, 2003, 23(2): 208-211. WANG YUAN-ZHAN, LI WEI, HUANG CHANG-HONG. Distribution of active earth pressure with wall movement of rotation about base [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, 23(2): 208-211.
- [18] FANG Y S, ISHIBASHI I. Static earth pressures with various wall movements [J]. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1986, 112(3): 317-333.
- [19] 可列因. 散粒体结构力学[M]. 陈万佳, 译. 北京: 人民交通出版社, 1983.

(编辑 胡英奎)