

文章编号:1671-6833(2004)03-0056-04

层状填土的主动土压力计算

刘忠玉¹, 马德遂², 何盛东³

(1. 郑州大学土木工程学院, 河南 郑州 450002; 2. 河南天方药业股份有限公司, 河南 驻马店 463003; 3. 河南省交通公路工程局, 河南 郑州 450052)

摘 要: 假定滑裂面为通过墙踵的折线, 将水平层分析法推广到填土分层的挡土墙的土压力计算中, 合理地解释了墙背不光滑时主动土压力分布的非线性特点. 在平移模式下, 水平层分析方法可得到和库仑理论基本一致的主动土压力合力, 但是得到的倾覆力矩大于按库仑理论得到的结果, 而且合力作用点明显高于库仑理论的结果, 这说明库仑理论高估了平移模式下挡土墙的抗倾覆稳定性. 另外, 理论分析表明墙后上软下硬的填土方案要优于上硬下软的填土方案.

关键词: 分层填土; 挡土墙; 主动土压力; 合力作用点

中图分类号: TU 411.2 **文献标识码:** B

0 引言

当前主动土压力的计算有了较大的发展, 例如: 文献[1, 2] 分别提出了考虑土压力与墙体变位关系的协调变形计算方法, 文献[3] 介绍了考虑土体实际应力应变关系的有限单元法, 等等. 但是在实际工程设计中, 普遍使用的仍是基于极限状态理论的朗肯理论或库仑理论, 而且常常假定主动土压力呈线性分布. 而工程实测结果和模型试验表明, 土压力一般是曲线分布. 因此, 文献[3~6] 介绍了计算极限土压力的水平层分析法, 该法在满足库仑假定的基础上, 将滑楔水平分层, 通过分析任意水平层单元的平衡条件合理地解释了土压力的非线性分布问题, 文献[7] 则将该法推广至考虑地震荷载的挡土墙. 但是他们仅讨论了墙后填土均匀的情况.

在实际工程中, 墙后为分层填土的情况经常遇到, 因此开展此问题的研究具有一定的现实意义. 本文拟将水平层分析法推广到墙后为分层填土的情况, 鉴于问题的复杂性, 仅对刚性挡土墙平移时的主动土压力分布进行研究.

1 公式推导

假定墙背竖直, 墙高 h , 墙后无粘性填土面水平, 共分 n 层, 地面作用均匀荷载 q_n (图 1). 其中

第 i 层厚 h_i , 重度为 γ_i , 内摩擦角为 φ_i , 与墙背间的摩擦角为 δ_i . 另外假定滑裂面为通过墙踵的折线, 在第 i 层填土中与竖直方向夹角为 θ_i .

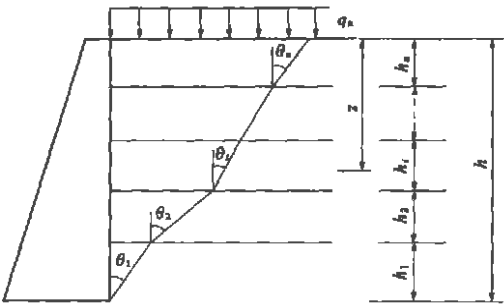


图 1 分层填土的挡土墙及折线滑裂面
Fig. 1 Schematic of a retaining wall with layered backfills and a broken-line rupture

考虑极限平衡状态下滑动楔体位于第 i 层填土中距填土表面为 z 厚度为 dz 的水平微元块 $ABCD$ 的平衡. 该微元块所受到的作用力有(图 2): 顶面的垂直压力 q , 底面的竖直反力 $q + dq$, 挡土墙的反力 p , 滑裂面以下土体的反力 r , 重力 dw . 其中微元块土体的自重为

$$dw = \gamma_i \sum_{j=1}^{i-1} h_j (\tan \theta - \tan \varphi) + (h - z) \tan \varphi dz \quad (1)$$

当 dz 足够小时, 可以认为图 2 中作用在微元块 $ABCD$ 两边 AC 和 BD 上的分布力 p 和 r 的合力分别作用在这两边的中点上. 这样考虑该微元块

收稿日期: 2004-04-28; 修订日期: 2004-07-01

基金项目: 河南省高校青年骨干教师资助计划项目

作者简介: 刘忠玉(1968-) 男, 河南省延津县人, 郑州大学副教授, 博士. 主要从事岩土力学方面的研究.

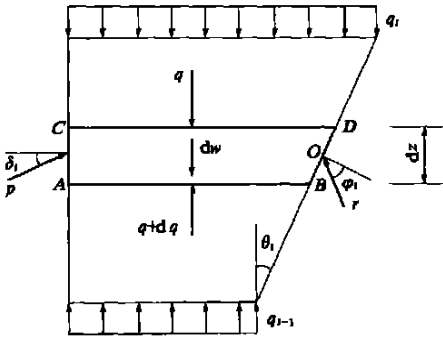


图 2 微元块受力简图

Fig. 2 Forces acting on a level thin layer element
水平向和竖向力的平衡, 以及对边 BD 中点 O 的力矩平衡可得

$$r\cos(\theta+\varphi_i)=p\cos\hat{\varphi}\cos\theta\tag{2}$$

$$p\sin\hat{\varphi}dz+\frac{r}{\cos\theta}dz\sin(\theta+\varphi_i)-q\tan\theta dz+\\(dq-\gamma dz)\big[\sum_{j=1}^{i-1}h_j(\tan\theta-\tan\hat{\varphi})+(h-z)\tan\hat{\varphi}\big]=0\tag{3}$$

$$2p\sin\hat{\varphi}dz+(dq-\gamma dz)\big[\sum_{j=1}^{i-1}h_j(\tan\theta-\tan\hat{\varphi})+\\(h-z)\tan\hat{\varphi}\big]=0\tag{4}$$

以上各式消去 r , 即

$$p=q\tag{5}$$

$$\frac{dq}{dz}-\frac{q}{H-z}=\gamma\tag{6}$$

式中,

$$\alpha=\frac{\tan\theta\cos(\theta+\varphi_i)}{\sin(\theta+\varphi_i-\hat{\varphi})}\tag{7}$$

$$\beta=-\frac{2\sin\hat{\varphi}\cos(\theta+\varphi_i)}{\sin(\theta+\varphi_i-\hat{\varphi})}\tag{8}$$

$$H=h+\sum_{j=1}^{i-1}h_j\frac{\tan\theta}{\tan\hat{\varphi}}\tag{9}$$

对式 (6) 须从上往下逐层求解. 在第 i 层顶面和第 $i+1$ 层底面, 即 $z=\sum_{j=i+1}^n h_j$ 处, q 应是连续的, 设为 q_i , 考虑到边界条件: $z=0$ 时, $q=q_n$, 可得

$$q=\frac{q_n H^\beta}{(H-z)^\beta}+\frac{\gamma H^{\beta+1}}{(\beta+1)(H-z)^\beta}-\frac{\gamma(H-z)}{\beta+1}\tag{10}$$

式中,

$$H=h_i+\sum_{j=1}^{i-1}h_j\frac{\tan\theta}{\tan\hat{\varphi}}\tag{11}$$

所以, 填土与挡土墙之间的相互作用力为

$$p=\frac{q_n H^\beta}{(H-z)^\beta}+\frac{\alpha\gamma H^{\beta+1}}{(\beta+1)(H-z)^\beta}-\frac{\alpha\gamma(H-z)}{\beta+1}\tag{12}$$

很明显, 只要 $\beta\neq 0$, 即 $\hat{\varphi}\neq 0$, p 就不是深度 z 的线性函数. 也就是说, 常用的库仑理论中关于 p 是 z 的线性函数的假定仅当墙背光滑时才是合理的.

对上式关于 z 从 0 到 h 积分可得作用在墙背上的土压力合力 E , 即

$$E=\int_0^h qdz=\sum_{i=1}^n\int_{h_{i-1}}^{h_i} qdz\tag{13}$$

很明显, 它是破裂角 $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n$ 的函数. 但这些破裂角并不是相互独立的. 如图 3 所示, 当挡土墙前移或绕墙底转动时, 墙后土体以同一滑动速度 V 斜向下滑动. 假定土体遵循摩尔-库仑屈服准则和服从相关联的流动法则, 则第 i 层填土中的破裂角 θ 与其下一层填土中的破裂角 θ_{i-1} 之间存在下列关系

$$\theta=\theta_{i-1}+\varphi_{i-1}-\varphi\tag{14}$$

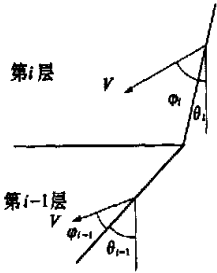


图 3 服从相关联流动法则时填土的运动形式
Fig. 3 Movement mode of backfills with associated flow rules

这样才能保证墙后多层填土以同一滑动速度 V 斜向下滑动, 从而也自然满足了多层填土的变形协调条件. 因此, 对于一个特定的挡土墙来说, 土压力合力 E 仅是破裂角 θ_1 的函数, 对式 (13)

关于 θ_1 求导, 并令 $\frac{dE}{d\theta_1}=0$, 可得使该式取最大值时的破裂角 θ_{cr} , 将它分别代入式 (12) 和 (13) 即为主动土压力分布 p_a 和合力 E_a . 而合力作用点距墙踵的距离可用下式求解:

$$y_a=\frac{M_a}{E_{ah}}=\frac{\sum_{i=1}^n\int_{h_{i-1}}^{h_i} p_a(h-z)\cos\hat{\varphi}dz}{\sum_{i=1}^n\int_{h_{i-1}}^{h_i} p_a\cos\hat{\varphi}dz}\tag{15}$$

式中: E_{ah} 表示 E_a 的水平分量.

2 算例及讨论

例 1 某挡土墙后下硬上软两层填土, 设下层土参数为: $h_1=2\text{ m}$, $\varphi_1=30^\circ$, $\gamma_1=18\text{ kN/m}^3$; 上层土参数: $h_2=2\text{ m}$, $\varphi_2=20^\circ$, $\gamma_2=16\text{ kN/m}^3$, 地面作用均布荷载 20 kPa . 且每层填土与墙体之间的

摩擦角分别取为该层填土内摩擦角 φ 的 0, 1/3, 2/3 倍. 按本文方法得到的底层填土中的极限破裂角分别为 28.47° , 30.72° 和 32.54° , 另外按本文方法和文献 [3] 介绍的基于库仑理论的等代厚度法分别计算的主动土压力合力 E_a , 合力作用点位置 y_a 以及以墙趾为转动中心的倾覆力矩 M_a 示于表 1. 很明显, 两种方法计算得到的主动土压力合力相差不大. 而当墙背不光滑, 即填土与墙背之间的摩擦角 $\hat{\varphi}$ 不等于零时, 按本文方法得到的倾覆力矩大于库仑理论, 合力作用点也明显高于库仑理论. 这可从主动土压力沿墙高的分布来解释. 图 4 是 $\hat{\varphi}=2\varphi/3$ 时的结果. 从该图可以看出, 按本文方法计算得到的主动土压力沿墙高是曲线分布, 且在上半部大于按库仑理论计算的结果. 这样倾覆力矩 M_a 自然是按本文方法计算的结果为大, 所以合力作用点高于库仑理论. 也就是说, 墙体平移时库仑理论明显高估了墙体的抗倾覆稳定性. 另外, 由表 1 还可以看出, 按库仑理论得到的倾覆力矩明显受到填土与墙体之间摩擦角 $\hat{\varphi}$ 的影响, 而按本文方法得到的 M_a 却与 $\hat{\varphi}$ 关系不大.

表 1 例 1 的计算结果

$\hat{\varphi}/\varphi$	$E_a/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-1})$		y_a/m		$M_a/(\text{kN}\cdot\text{m}\cdot\text{m}^{-1})$	
	库仑理论	本文方法	库仑理论	本文方法	库仑理论	本文方法
	库仑理论	本文方法	库仑理论	本文方法	库仑理论	本文方法
0	81.97	81.67	1.749	1.747	143.34	142.68
1/3	76.14	75.97	1.757	1.880	132.31	141.25
2/3	73.04	72.95	1.766	1.996	123.26	139.42

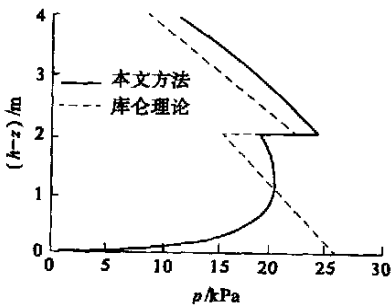


图 4 例 1 中 $\hat{\varphi}=2\varphi/3$ 时的主动土压力分布

Fig. 4 Distribution of active earth pressures with $\hat{\varphi}=2\varphi/3$ for Example 1

例 2 某挡土墙后下软上硬两层填土, 即将例 1 中上下两层土的物理力学参数互换, 其他同例 1. 从示于表 2 的计算结果可知, 两种方法得到的主动土压力合力 E_a , 合力作用点位置 y_a 以及以墙趾为转动中心的倾覆力矩 M_a 具有和例 1 相同的规律, 但是本例中的主动土压力合力 E_a 要

大于例 1 中的对应值. 另外按本文方法得到的底层填土中的极限破裂角分别为 36.91° , 39.48° 和 41.66° , 也大于例 1 中的对应值, 即破裂体的范围以本例为大. 这说明墙后上软下硬的填土方案要优于上硬下软的填土方案. 所以, 工程实践中应注意合理的分层填土的顺序, 以达到合理经济的设计目的.

表 2 例 2 的计算结果

$\hat{\varphi}/\varphi$	$E_a/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-1})$		y_a/m		$M_a/(\text{kN}\cdot\text{m}\cdot\text{m}^{-1})$	
	库仑理论	本文方法	库仑理论	本文方法	库仑理论	本文方法
	库仑理论	本文方法	库仑理论	本文方法	库仑理论	本文方法
0	95.94	95.62	1.432	1.430	137.37	136.70
1/3	89.38	89.03	1.425	1.556	126.28	137.27
2/3	85.55	85.13	1.419	1.670	117.17	136.88

3 结论

(1) 本文用水平层分析法分析了墙背竖直, 墙后无粘性填土分层且填土面水平的挡土墙上作用的主动土压力的曲线分布情况, 得到的主动土压力合力与库仑理论基本吻合. 这说明本文方法是合理的.

(2) 当墙背不光滑时, 按本文方法得到的倾覆力矩大于按库仑理论得到的结果, 而且合力作用点也明显高于按库仑理论得到的结果. 这说明墙体平移时库仑理论明显高估了墙体的抗倾覆稳定性.

(3) 通过两个算例的对比说明墙后上软下硬的填土方案要优于上硬下软的填土方案.

(4) 本文方法也可推广至墙背倾斜, 墙后粘性填土的情况.

参考文献:

[1] 梅国雄, 辛金珉. 考虑变形的朗肯土压力模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(6): 851~853.
[2] 刘忠玉, 李永振. 土体非线性对水泥土挡墙水平位移的影响[J]. 郑州大学学报(工学版), 2003, 24(1): 20~23.
[3] 顾慧慈. 挡土墙土压力计算[M]. 北京: 中国建材工业出版社, 2001.
[4] 王元战, 王海龙, 张文忠. 挡土墙土压力分布[J]. 中国港湾建设, 2000, 14(4): 1~5.
[5] 阮波, 冷伍明, 李亮. 土压力非线性分布的研究[J]. 长沙铁道学院学报, 2001, 19(4): 73~76.
[6] 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, (2): 102~106.
[7] 刘忠玉, 杨会朋. 刚性挡土墙地震主动土压力的非

线性分布[J]. 郑州大学学报(工学版), 2004, 25

(2): 36~38.

Active Earth Pressure Acting on Retaining Walls with Layered Backfills

LIU Zhong-yu¹, MA De-sui², HE Sheng-dong³

(1. College of Civil Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450002, China; 2. Henan Topfond Pharmaceutical Co Ltd., Zhumadian 463003, China; 3. Henan Traffic Highway Engineering Bureau, Zhengzhou 450052, China)

Abstract: The rupture line is assumed as a broken line through the heel, and the method of level layer analysis is introduced to calculate the earth pressure acting on the retaining walls with layered backfills. The nonlinear distributions of active earth pressure on retaining walls with rough backs can be explained by using the method. The calculated results show that, for the movement mode of translation, the resultant forces calculated by using the method are approximately equal to those calculated by using Coulomb Theory, while the overturning moments of force and the heights of acting point of the resultant by using the former are higher, which means that the ability of the walls to resist overturning is overestimated by using Coulomb theory for the movement mode of translation. In addition, the analysis on the wall with two layered backfills shows that the filling project with a soft upper layer and a stiff lower layer is better than that with a stiff upper layer and a soft lower layer.

Key words: layered backfills; retaining wall; active earth pressure; acting point of the resultant force

(上接第 17 页)

Numerical Simulation of the Particles' Track in a Cyclone Separator

WEI Xin-li, ZHANG Hai-hong, WANG Ding-biao, MENG Xiang-trui

(College of Chemical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: The movement of particles in a cyclone separator has been studied by numerical simulation. We adopt the Reynolds stress model for the single phase and the coupling discrete random walk model for the two phase. The physical mechanism for the movement of particles in a cyclone separator is revealed by describing the particles' tracks. The results show that the particles' movement is more complex and random. The small particles are easily influenced by turbulence, and their tracks and finally positions are different even if their diameters and first positions are the same. The small particles are more easily influenced by the second vortex so that they reduce the separating efficiency. We have also predicted the phenomena affecting the separation efficiency—the up ash loop, the short circuit of exhaust duct and the return confusion of eject dust duct. All this makes for a better understanding of the separation mechanism of cyclone separator, and forms the basis for the further theory and experiment study on the cyclone separator.

Key words: cyclone separator; numerical simulation; coupling; track