



基于非线性破坏准则的被动土压力极限上限分析

王恭兴¹, 张国祥²

(1. 中南勘测设计研究院, 湖南 长沙 410014; 2. 中南大学土木建筑学院, 湖南 长沙 410004)

摘 要: 针对刚性挡土墙的墙后被动土压力采用非线性破坏准则, 提出利用多切线法引入瞬时变量 C_t 和 φ_t , 在塑性极限上限定理的基础上, 建立了被动土压力问题的多三角形破坏机构, 推导了基本计算公式, 并根据序列二次规划法对三角形单元划分方式进行优化, 从而得到最小的上限解。通过与已有研究成果进行对比分析, 表明计算结果合理, 是一种严格的上限解。

关键词: 被动土压力; 非线性破坏准则; 上限定理; 序列二次规划

中图分类号: TU457

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2009)12-1907-06

作者简介: 王恭兴(1981-), 男, 湖南桂阳人, 硕士, 主要从事岩土力学与工程方面的研究。E-mail: wanggongxing7221@126.com。

Upperbound limit analysis of passive earth pressure based on nonlinear failure criterion

WANG Gong-xing¹, ZHANG Guo-xiang²

(1. Mid-south Design & Research Institute, Changsha 410014, China; 2. School of Civil Engineering and Architecture, Changsha 410004, China)

Abstract: The influence of a nonlinear strength envelope is considered in the framework of the limit analysis of plasticity. The passive earth pressure on the rigid walls is estimated using the upper bound theorem of the limit analysis in conjunction with the nonlinear failure criterion. A generalized tangential technique, multi-tangential line to the nonlinear failure criterion, is used to import the variable C_t and φ_t for the first time. Based on the upper bound theory, the multi-triangle failure mechanism is considered, some basic formulae are deduced, and the minimum upper bound solutions of passive earth pressure are presented by applying a nonlinear sequential quadratic programming (SQP) algorithm. From the numerical results, it can be seen that the solutions are reasonable and rigorous upper-bound ones.

Key words: passive earth pressure; nonlinear failure criterion; upper bound theory; sequential quadratic programming

0 引 言

自1773年Coulomb和1857年Rankine建立土压力计算理论以来, 诸多学者对土压力的计算理论及方法进行了研究, 扩展了库仑和朗肯土压力理论的应用范围, 并提出了许多新的计算方法和理论, 如能量理论、水平层计算方法、土压力的空间计算理论等, 使土压力的计算方法和理论渐趋完善和合理。随着塑性流动理论的发展, 塑性极限分析方法在岩土力学中得到广泛的应用, 并在斜坡稳定、地基承载力和土压力问题中取得了一系列成果^[1-5]。Davis^[6]研究了由两个刚性滑块组成的破坏机构; Collins^[7]、Mroz^[8]等学者应用极限分析方法研究被动土压力问题; Soubra^[9]根据上限定理, 将挡墙后填土划分为单刚块或多刚块体系, 应用规划理论求解被动土压力问题。

目前, 基于极限状态的土压力计算中, 往往采用线性Mohr-Coulomb破坏准则。也有学者根据非线性

破坏准则采用单切线法求解土压力。单切线法简单的把非线性破坏准则线性化, 假设挡墙后填土处于单一应力状态, 没有考虑在挡墙后填土的不同位置由于法线应力 σ_n 的不同而导致 C_t 、 φ_t 值的不同。本文根据非线性破坏准则, 考虑了挡墙后填土在不同位置 C_t 、 φ_t 值是不同的, 采用多切线法利用极限分析上限理论和多三角形破坏机构的计算原理分析被动土压力。

1 非线性破坏准则^[10]

在岩土工程中大都采用线性Mohr-Coulomb准则, 认为最大主应力 σ_1 和最小主应力 σ_3 呈线性关系, 其表达式为

$$\sigma_1 = \frac{2c \cdot \cos \varphi}{1 - \sin \varphi} + \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \sigma_3 \quad (1)$$

在实际工程中,许多实验数据表明岩土破坏时的最大主应力和最小主应力是非线性关系,而线性关系是其中的一个特例,文献[11~14]的三轴实验结果都证明了破坏准则是非线性的,可描述为

$$\sigma_1 = q_p + M_p^* \left(\frac{\sigma_3}{q_p} \right)^\alpha \quad (2)$$

式中, M_p^* 和 α 均为三轴实验确定的参数。

在应力空间 (τ , σ_n) 中,式(2)可等价于

$$\tau = C_0 \left(1 + \frac{\sigma_n}{\sigma_t} \right)^{\frac{1}{m}} \quad (3)$$

式(3)中 C_0 为曲线与纵轴的截距,它与 σ_t 和 m 均为岩土材料参数。当 $m=1$ 时,式(3)即为线性 Mohr-Coulomb 破坏准则的表达式。

将式(3)绘制成曲线,如图1所示。

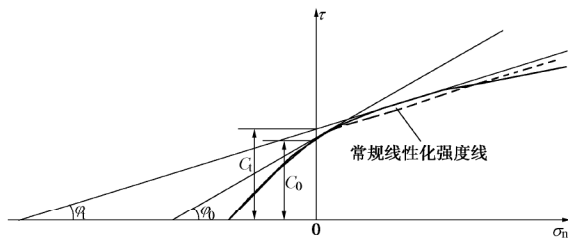


图1 非线性破坏准则曲线及其切线

Fig. 1 Curves of a nonlinear failure criterion and its tangential line
其切线方程为

$$\tau = C_t + \tan \varphi_t \cdot \sigma_n \quad (4)$$

式中, C_t , $\tan \varphi_t$ 分别表示切线的截距和斜率,

$$C_t = \frac{m-1}{m} C_0 \left(\frac{m \sigma_t \tan \varphi_t}{C_0} \right)^{\frac{1}{1-m}} + \sigma_t \tan \varphi_t \quad (5)$$

$$\tan \varphi_t = \frac{d\tau}{d\sigma_n} = \frac{\tan \varphi_0}{m} \left(1 + \frac{\sigma_n}{\sigma_t} \right)^{\frac{1-m}{m}} \quad (6)$$

2 多刚块机构

最早在边坡极限分析中,就挡墙后的破裂体作为一个刚体来进行极限分析的,Davis^[6]研究了由两个刚性滑块组成的破坏机构,A H Soubra^[9]和 Michalowski^[15]则尝试了在线性破坏准则下将挡墙后填土分成更多块刚性的滑块,然后建立机动容许的位移速度场,利用上限定理求解。本文亦采用该法,但采用的是非线性破坏准则。

从图2中可以看出,挡墙后土体已被 k 个大小不一的三角形分成了 k 个刚性体滑块,每个三角形的边长由 L_i 、 α_i 和 β_i 控制,已知墙高为 H ,则可以依次推得各个三角形的侧边长为:

$$L_i = \frac{H \prod_{j=1}^{i-1} \sin \beta_j}{\cos \alpha_i \prod_{j=1}^{i-1} \sin(\alpha_j + \beta_j)} \quad (7)$$

$$L'_i = \frac{H \sin \alpha_i \prod_{j=1}^{i-1} \sin \beta_j}{\cos \alpha_i \prod_{j=1}^i \sin(\alpha_j + \beta_j)} \quad (8)$$

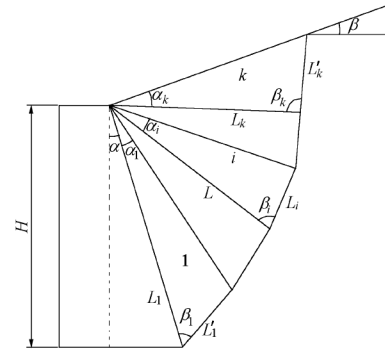


图2 单元划分示意图

Fig. 2 Diagram of element division

图3给出了被动土压力的速度场示意图。根据相关联的正交流动法则,刚体平移时位移速度与刚体界面必呈 φ 角。但由于不同单元边界处的应力状态不同, φ 角的取值不同,故三角形公共边上的瞬时摩擦角用 φ_i 表示,而三角形底边的瞬时摩擦角用 φ'_i 表示。

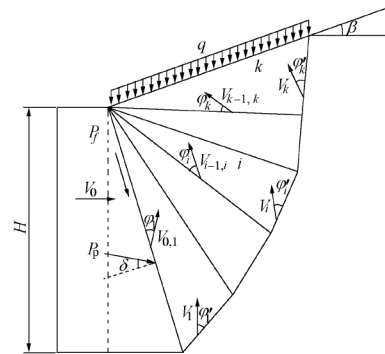


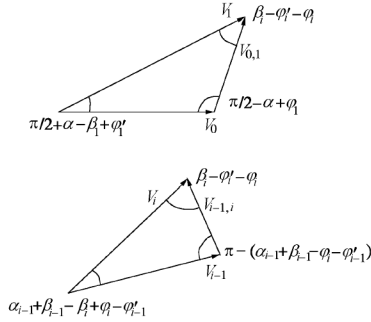
图3 被动破坏机制下的速度场

Fig. 3 Velocity field of passive failure mechanism

图4给出了第1号单元和第 i 号单元的速度矢量图,其中 V_0 为挡土墙水平运动的绝对速度, V_i 为填土中第 i 号块的绝对速度, $V_{1,2}$ 为1号块和2号块之间的相对速度, $V_{i-1,i}$ 为第 $i-1$ 号块与第 i 号块之间的相对速度。这些速度之间有如下的关系:

$$V_i = \frac{V_1 \prod_{j=1}^{i-1} \sin(\alpha_j + \beta_j - \varphi'_j - \varphi_{j+1})}{\prod_{j=1}^{i-1} \sin(\beta_{j+1} - \varphi'_{j+1} - \varphi_{j+1})} \quad (9)$$

$$V_{i,i+1} = \frac{\sin(\alpha_i - \beta_{i+1} + \beta_i + \varphi'_{i+1} - \varphi'_i)}{\sin(\beta_{i+1} - \varphi_{i+1} - \varphi'_{i+1})} \cdot \frac{V_1 \prod_{j=1}^{i-1} \sin(\alpha_j + \beta_j - \varphi'_j - \varphi_{j+1})}{\prod_{j=1}^{i-1} \sin(\beta_{j+1} - \varphi'_{j+1} - \varphi_{j+1})} \quad (10)$$

图 4 第 1 号单元和第 i 号单元的速度矢量图Fig. 4 Velocity hodograph for the first and i th elements

2.1 内能耗散率的计算

由于内能的耗散仅发生在速度不连续面上, 即三角形单元的公共边和底边上, 故内能耗散率

$$\dot{W}_{\text{int}} = \sum_{i=1}^k L_i c_i V_{i-1,i} \cos \varphi_i + \sum_{i=1}^k L'_i c'_i V_i \cos \varphi'_i \quad (11)$$

其中, c_i 和 c'_i 分别为三角形单元公共边和底边上的瞬时黏聚力。

将式 (11) 化简得

$$\dot{W}_{\text{int}} = (f_1 + f_2) L_1 V_1 \quad (12)$$

其中

$$f_1 = \sum_{i=2}^k c_i \cos \varphi_i \times \prod_{j=1}^{i-1} \frac{\sin \beta_j \sin(\alpha_j + \beta_j - \beta_{i+1} - \varphi'_j + \varphi'_{j+1})}{\sin(\alpha_j + \beta_j) \sin(\beta_{j+1} - \varphi'_{j+1} - \varphi_{j+1})} + \frac{c_1 \cos \varphi_1 \cos(\beta_1 - \alpha - \varphi'_1)}{\cos(\alpha - \varphi_1)},$$

$$f_2 = \sum_{i=1}^k c'_i \frac{\sin \alpha_i \cos \varphi'_i}{\sin(\alpha_i + \beta_i)} \cdot \prod_{j=1}^{i-1} \frac{\sin \beta_j \sin(\alpha_j + \beta_j - \varphi'_j - \varphi_{j+1})}{\sin(\alpha_j + \beta_j) \sin(\beta_{j+1} - \varphi'_{j+1} - \varphi_{j+1})}.$$

2.2 外力做功功率的计算

考虑填土的自重, 则外力的做功包括重力所做功、超载所做功、黏附力所做功和土压力所做功。下面分别计算它们的功率。

(1) 重力功率

设挡墙高为 H , 填土的重度为 γ 。则重力做功率

$$\dot{W}_{\text{gra}} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^k L_i L_{i+1} \sin \alpha_i \cos \left(\sum_{j=1}^{i-1} \alpha_j - \beta_i + \alpha + \varphi'_i \right) V_i \gamma \quad (13)$$

将 (13) 式化简得

$$\dot{W}_{\text{gra}} = \frac{\gamma}{2} L_1^2 f_3 V_1 \quad (14)$$

其中,

$$f_3 = - \sum_{i=1}^k \left[\frac{\sin \alpha_i}{\sin \beta_i} \times \sin(\alpha_i + \beta_i) \times \cos \left(\sum_{j=1}^{i-1} \alpha_j - \beta_i + \alpha + \varphi'_i \right) \cdot \prod_{j=1}^i \frac{\sin^2 \beta_j}{\sin^2(\alpha_j + \beta_j)} \times \prod_{j=1}^{i-1} \frac{\sin(\alpha_j + \beta_j - \varphi'_j - \varphi_{j+1})}{\sin(\beta_{j+1} - \varphi'_{j+1} - \varphi_{j+1})} \right].$$

(2) 超载功率

设地面的均布荷载为 q , 分布的范围为第 k 号三角形单元的边长 L_{k+1} , 位移方向为第 k 号三角形单元的绝对速度方向, 则超载做功率可以写成

$$\dot{W}_q = q L_{k+1} V_k \sin(\alpha_k + \beta_k - \varphi'_k - \beta) \quad (15)$$

化简得

$$\dot{W}_q = q L_1 f_4 V_1 \quad (16)$$

其中,

$$f_4 = - \sin(\alpha_k + \beta_k - \varphi'_k - \beta) \cdot \prod_{j=1}^k \frac{\sin \beta_j}{\sin(\alpha_j + \beta_j)} \cdot \prod_{j=1}^{k-1} \frac{\sin(\alpha_j + \beta_j - \varphi'_j - \varphi_{j+1})}{\sin(\beta_{j+1} - \varphi'_{j+1} - \varphi_{j+1})}.$$

(3) 黏附力功率

$$\dot{W}_{\text{bf}} = -c'_1 L_1 \frac{\tan \delta}{\tan \varphi'_1} \sin(\beta_1 - \varphi'_1) V_1 \quad (17)$$

将式 (17) 化简得

$$\dot{W}_{\text{bf}} = L_1 f_5 V_1 \quad (18)$$

其中, $f_5 = -c'_1 \frac{\tan \delta}{\tan \varphi'_1} \sin(\beta_1 - \varphi'_1)$ 。

(4) 被动土压力功率

极限荷载作用于 1 号单元上, 故其功率

$$\dot{W}_{\text{pE}} = P_{\text{pE}} \sin(\beta_1 - \varphi'_1 - \delta) V_1 \quad (19)$$

总的外力功率

$$\dot{W}_{\text{ext}} = \frac{\gamma}{2} L_1^2 f_3 V_1 + q L_1 V_1 f_4 + L_1 f_5 V_1 + P_{\text{pE}} \sin(\beta_1 - \varphi'_1 - \delta) V_1 \quad (20)$$

据虚功率原理, 有

$$\dot{W}_{\text{int}} = \dot{W}_{\text{ext}} \quad (21)$$

由式 (21) 可以解得

$$P_{\text{pE}} = \frac{H [(f_1 + f_2) - \gamma H f_3 / (2 \cos \alpha) - q f_4 - f_5]}{\cos \alpha \sin(\beta_1 - \varphi'_1 - \delta)} \quad (22)$$

化简为

$$P_{\text{pE}} = \frac{1}{2} \gamma H^2 K_{\text{pE}\gamma} + q H K_{\text{pE}q} + H K_{\text{pEC}} \quad (23)$$

其中,

$$K_{\text{pE}\gamma} = \frac{f_3}{\cos^2 \alpha \sin(\beta_1 - \varphi'_1 - \delta)} \quad (24)$$

$$K_{\text{pE}q} = \frac{-f_4}{\cos \alpha \sin(\beta_1 - \varphi'_1 - \delta)} \quad (25)$$

$$K_{\text{PEC}} = \frac{f_1 + f_2 - f_3}{\cos \alpha \sin(\beta_1 - \varphi'_1 - \delta)} \quad (26)$$

在式 (22) 中, H , γ , q 都是已知量, 被动土压力 P_{PE} 仅与 f_1 , f_2 , f_3 , f_4 和 f_5 有关。由 f_1 , f_2 , f_3 , f_4 和 f_5 的表达式可看出, 它们分别是所有的三角形单元几何参数和填土物理参数的函数, 即取决于 α_i 、 β_i 和 φ_i 、 φ'_i 及 c_i 、 c'_i 的大小。由式 (5) 和式 (6) 可看出, φ_i 、 φ'_i 和 c_i 、 c'_i 满足一定的关系。所以, 当挡墙后填土的划分单元数为 k 个的时候, 变量数分别为: k 个 α 值, k 个 β 值, k 个不同的 (φ , c) 值和 k 个不同的 (φ' , c') 值, 即共有 $4k$ 个变量。很显然, 这些自变量应满足几何约束条件和速度场约束条件:

- ① $\sum_{i=1}^k \alpha_i = \pi/2 - \alpha + \beta$; ② $0 < \alpha_i + \beta_i < \pi$; ③ $0 < \alpha_i < \pi$;
④ $0 < \beta_i < \pi$; ⑤ $0 \leq \varphi_i \leq \pi/2$; ⑥ $0 \leq \varphi'_i \leq \pi/2$; ⑦
 $0 < \beta_i - \varphi_i - \varphi'_i < \pi$; ⑧ $0 < \alpha_i + \beta_i - \beta_{i+1} + \varphi'_{i+1} - \varphi'_i < \pi$ 。

由以上分析可知, 对于不同的自变量甚至是自变量组合都能得到不同的极限承载力上限解。但极限分析上限解总是大于真实极限荷载的, 所以上限解中越小的值越接近真正的极限荷载值, 所以对以上上限分析的求解实际上转化成了一个求最小值的问题。

3 算法及实例分析

3.1 对比分析

在建立上限目标函数时, 由于破坏准则是非线性的, 导致上限目标函数也是非线性函数, 因此, 在约束条件下, 采用序列二次规划算法进行优化。上分限析的目的是求得土体开始产生无限制流动下对应荷载的最小值。在约束条件下对式 (22) 求最小值。为了便于问题的分析, 这里采用参考文献[10]中的例子。岩土的材料参数 $C_0 = 90 \text{ kPa}$, $\sigma_t = 247.3 \text{ kPa}$, 此时墙背 $L_1 = 3 \text{ m}$, $\alpha = 10^\circ$, $\beta = 0^\circ$, $\delta = 30^\circ$, $q = 0 \text{ kPa}$, $\gamma = 19 \text{ kN/m}^3$ 。 m 分别取 1.0~1.8 的不同值, 同时取不同单元划分数 k , 来进行目标函数的优化计算。由表 1 及图 5 知, 对于相同的非线性参数 m , 随着单元数 k 值的增大计算结果趋于收敛, 被动土压力的上限值越来越接近于真实值。当前后两次的计算结果相差

不大时, 即可取此时的计算结果为极限分析的上限解。经计算表明, 当单元数 k 值取 7 时, 前后两次被动土压力的计算结果就基本一致了。

表 1 不同单元数 k 下的被动土压力

Table 1 Passive earth pressure with different k

k	$m=1.0$		$m=1.2$		$m=1.8$	
	P_{PE} /($\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$)	差值 /%	P_{PE} /($\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$)	差值 /%	P_{PE} /($\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$)	差值 /%
1	2140.8		1909.7		1680.3	
2	1573.9	26.48	1354.7	29.06	1126.6	32.95
3	1498.5	4.79	1307.8	3.46	1101.2	2.25
4	1485.9	0.84	1299.9	0.60	1096.9	0.39
5	1482.3	0.24	1297.6	0.18	1095.7	0.11
6	1480.9	0.09	1296.7	0.07	1095.2	0.05
7	1480.1	0.05	1296.2	0.04	1094.9	0.03

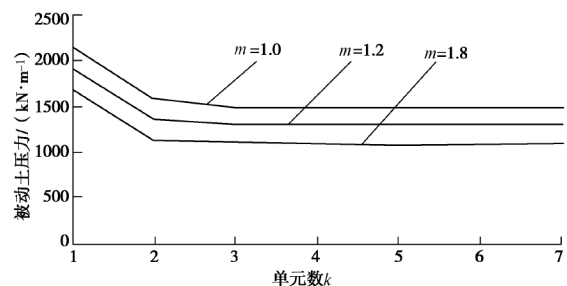


图 5 被动土压力与单元划分数 k 的关系

Fig. 5 The relationship between the passive earth pressure and the element number k

文献[10]的被动土压力计算方法与本文基本一致, 都是在非线性破坏准则下应用上限定理采用多刚块平动机制求解刚性挡土墙的被动土压力, 最大的区别是在本文采用多切线法, 在建立机动容许的位移速度场时将第 i 个三角刚块的移动速度 V_i 与速度间断线 L'_i 的夹角定为任意角 φ'_i ; 在相邻的三角形刚块之间, 相对速度 $V_{i-1,i}$ 与相互接触面也定为任意角 φ_i , 文献[10]则采用单切线法, 将它们都定义为固定值 φ_i 。从表 2 及图 6 可看出, 文献[10]计算的结果明显大于本文的计算结果, 最大的差值达到 19.82%, 最小的差值只有 2.73%。实际上, 切线法是一种将非线性破坏准则线性化的一种方法, 虽然同样经过优化计算, 但得到的上限解也远不能达到本文完全依据非线性破坏准则优化后得到的上限解的理想程度。本文计算结果更接近真实值。

表 2 单切线法计算结果与多切线法计算结果对比表

Table 2 Comparison between multi-tangential technique and single tangential technique

m	$\alpha = 5^\circ$			$\alpha = 10^\circ$		
	单切线法	多切线法	差值/%	单切线法	多切线法	差值/%
1.0	2678.8	2470.9	7.76	2200.9	2140.8	2.73
1.2	2440.6	2161.1	11.45	2031.5	1909.7	6.00
1.4	2323.4	2010.6	13.46	1944.2	1794.1	7.72
1.6	2260.0	1922.2	14.95	1895.1	1725.3	8.96
1.8	2224.2	1864.6	16.17	1866.2	1680.3	9.96
2.0	2204.2	1824.6	17.22	1848.9	1649.0	10.81
2.2	2193.6	1795.5	18.15	1838.8	1626.3	11.56
2.4	2189.0	1773.7	18.97	1833.3	1609.3	12.22
2.6	2188.2	1760.4	19.55	1830.9	1598.6	12.69
2.8	2190.0	1756.0	19.82	1830.5	1595.5	12.84

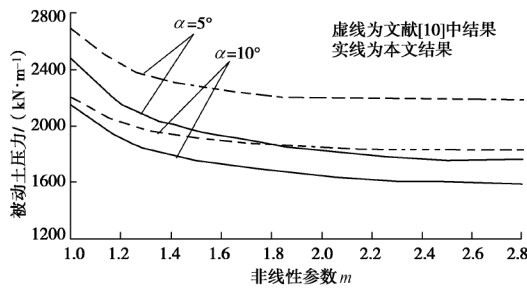
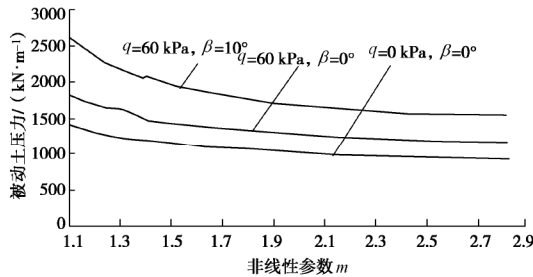


图 6 文献[10]计算结果与本文计算结果对比图

Fig. 6 Comparison between this paper and Ref. [10]

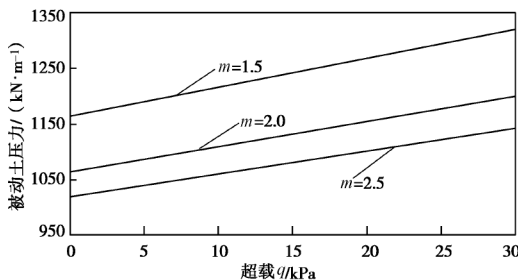
3.2 非线性参数 m 对被动土压力的影响

为了分析非线性参数 m 对被动土压力的影响, 取计算参数 $C_0 = 90 \text{ kPa}$, $\sigma_t = 247.3 \text{ kPa}$, $L_1 = 3 \text{ m}$, $K = 3$, $\alpha = 0^\circ$, $\delta = 0^\circ$, $\gamma = 19 \text{ kN/m}^3$ 。 m 取 1.1~2.8 之间的不同值, 由图 7 知, 随着 m 的增大, 被动土压力在减少, 墙后填土是否水平及填土表面是否受到外荷载作用等因素对土压力有重要影响。

图 7 被动土压力与非线性参数 m 的关系Fig. 7 Relationship between passive earth pressure and the nonlinear parameter m

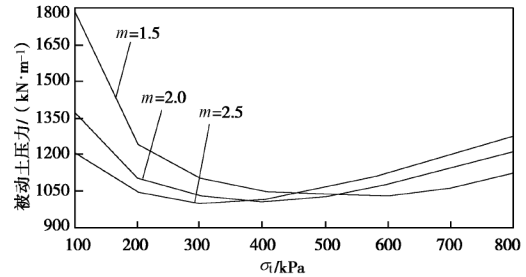
3.3 超载 q 对被动土压力的影响

计算超载作用对被动土压力影响时, 取参数 $C_0 = 90 \text{ kPa}$, $\sigma_t = 247.3 \text{ kPa}$, $L_1 = 3 \text{ m}$, $\alpha = 10^\circ$, $\beta = 0^\circ$, $\delta = 30^\circ$, $\gamma = 19 \text{ kN/m}^3$, $K = 7$ 。由图 8 知, 随着超载的增大被动土压力逐步增大。这是因为当填土表面作用荷载时, 将在挡土墙墙面上产生一个附加的土压力。附加土压力大小及其沿墙面的分布, 与荷载的大小及其在填土表面的分布有直接关系。荷载大则附加土压力大, 荷载在填土表面的分布不同, 附加土压力在墙面的分布也不同。

图 8 被动土压力与超载 q 的关系Fig. 8 Relationship between passive earth pressure and surcharge q

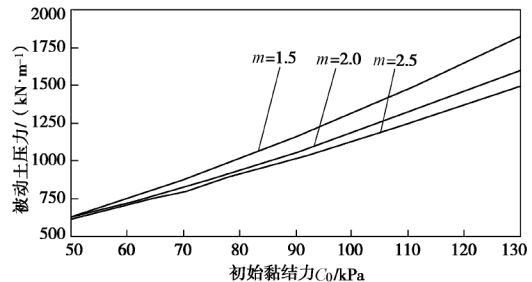
3.4 σ_t 对被动土压力的影响

计算 σ_t 对被动土压力影响时, 取计算参数 $C_0 = 90 \text{ kPa}$, $L_1 = 3 \text{ m}$, $\alpha = 10^\circ$, $\beta = 0^\circ$, $\delta = 30^\circ$, $\gamma = 19 \text{ kN/m}^3$, $q = 0 \text{ kPa}$, $K = 7$ 。由图 9 知, σ_t 对被动土压力有重要影响。

图 9 被动土压力与 σ_t 的关系Fig. 9 Relationship between passive earth pressure and tensile stress σ_t

3.5 初始黏结力 C_0 对被动土压力的影响

计算 C_0 对被动土压力影响时, 取参数 $\sigma_t = 247.3 \text{ kPa}$, $L_1 = 3 \text{ m}$, $\alpha = 10^\circ$, $\beta = 0^\circ$, $\delta = 30^\circ$, $\gamma = 19 \text{ kN/m}^3$, $q = 0 \text{ kPa}$, $K = 7$ 。由图 10 知, 随着初始黏结力 C_0 的增大, 被动土压力在增大。

图 10 被动土压力与初始黏结力 C_0 的关系Fig. 10 Relationship between passive earth pressure and initial cohesion C_0

4 结 论

挡土墙被动土压力问题是岩土工程领域中的基础性课题之一, 正确地评价被动土压力大小, 对于确保工程安全至关重要, 它一直受到国内外学者的关注。本文在非线性破坏准则下, 对岩土工程结构极限分析的基本公式进行了研究, 并推导出被动土压力公式, 推导的公式可适用于任意多个刚性三角形。由数值结果得出以下结论:

(1) 应用极限分析上限理论, 将挡墙后填土划分为若干三角形单元的分析方法来确定被动土压力是有效可行的。该方法需要运用大型的数学规划理论和工

具,通过优化计算选取出最优的三角形单元划分方式,从而得到最小的上限解。

(2) 取不同单元划分数 k 来进行目标函数的优化计算。对于相同的非线性参数,随着单元数 k 值的增大计算结果趋于收敛,土压力的上限值越来越接近于真实值。

(3) 在对被动土压力的计算和分析中,对于相同的非线性参数,随着单元数 k 值的增大计算结果趋于收敛;非线性参数 m 、 σ_t 、超载 q 及初始黏结力 C_0 对被动土压力有重要影响,在其他参数不变的情况下,随着 m 的增大,被动土压力在减少;随着超载及初始黏结力 C_0 的增大,被动土压力在增大。

(4) 通过与前人计算结果对比分析表明,本文方法合理可行,且具有一定的实用性。从计算结果看,单切线法计算的结果明显大于本文的计算结果,最大的差别能达到19.82%,事实上,切线法是一种将非线性破坏准则线性化的一种方法,虽然同样经过优化计算,但得到的上限解也远不能达到本文采用多切线法完全依据非线性破坏准则优化后得到上限解的理想程度。

参考文献:

- [1] 顾慰慈. 挡土墙土压力计算[M]. 北京: 中国建材工业出版社, 2001. (GU Wei-ci. Retaining wall of earth pressure computation[M]. Beijing: China Building Material Industry Publishing House, 2001. (in Chinese))
- [2] CHEN W F, SCAWTHORN C R. Limit analysis and limit equilibrium solutions in soil mechanics[J]. Soils and Foundations, 1970, **10**(3): 13 - 49.
- [3] TERZAGHI K, PECK R B. Soil mechanics in engineering practice[M]. 2nd ed. New York: John Wiley & Sons Inc, 1967: 729.
- [4] CHEN W F. Limit analysis and soil plasticity[M]. Amsterdam: Elsevier, 1972.
- [5] YANG Xiao-li, YIN Jian-hua. Estimation of seismic passive earth pressures with nonlinear failure criterion[J]. Engineering Structures, 2006, **28**: 342 - 348.
- [6] DAVIS E H. Theories of plasticity and the failure of soil masses[M]// LEE I K. Soil Mechanics-selected Topics. New York: American Elsevier, 1968: 341 - 380.
- [7] COLLINS I F. The upper bound theorem for rigid-plastic solids to include Coulomb friction[J]. Journal the Mechanics and Physics of Solids, 1969, **17**(5): 323 - 338.
- [8] MROZ Z, DRESCHER A. Limit plasticity approach to some cases of flow of bulk solids[J]. Journal of Engineering for Industry, 1969, **91**: 357 - 364.
- [9] SOUBRA A H. Static and seismic passive earth pressure coefficients on rigid retaining structures[J]. Can Geotech J, 2000, **37**: 463 - 478.
- [10] 杨小礼. 线性与非线性破坏准则下岩土极限分析方法及应用[D]. 长沙: 中南大学, 2002. (YANG Xiao-li. Limit analysis method and its application to geotechnical engineering with linear and nonlinear failure criteria[D]. Changsha: Central South University, 2002. (in Chinese))
- [11] LADE P V. Elastic-plastic stress-strain theory for cohesionless soil with curved yield surface[J]. Int J Soils Struct, 1997, **13**(11): 1019 - 1035.
- [12] AGAR J G, MORGENSTEM N R, SCOTT J. Shear strength and stress-strain behaviour of a thabasca oil sand at elevated temperature and pressure[J]. Can Geotech J, 1985, **24**(1): 1 - 10.
- [13] SANTARELLI F. Theoretical and experimental investigation of the stability of axisymmetric borehole[D]. London: University of London, 1987.
- [14] HOCK E, BROWN E. Empirical strength criterion for rock masses[J]. Journal of Geotechnical Engineering Division, 1980, **18**(2): 1013 - 1035.
- [15] MICHALOWSKI R L. An estimate of the influence of soil weight on bearing capacity using limit analysis[J]. Soils and Foundations 1997, **37**(4): 57 - 64.
- [16] 杨小礼, 李 亮, 刘宝琛. 非线性破坏准则对被动土压力的影响[J]. 工程力学, 2004, **21**(1): 31 - 36. (YANG Xiao-li, LI liang, LIU Bao-chen. Influences of a nonlinear failure criterion on passive earth pressure[J]. Engineering Mechanics, 2004, **21**(1): 31 - 36. (in Chinese))
- [17] 范 文, 沈珠江, 俞茂宏. 基于统一强度理论的土压力极限上限分析[J]. 岩土工程学报, 2005, **16**(2): 1147 - 1153. (FAN Wen, SHEN Zhu-jiang, YU Mao-hong. Upper-bound limit analysis of earth pressure based on unified strength theory[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, **16**(2): 1147 - 1153. (in Chinese))