

基于混合粒子群算法和能量法主动土压力计算

陈昌富, 唐仁华, 梁冠亭

(湖南大学 岩土工程研究所, 长沙 410082)

摘 要: 假定挡土墙后填土滑动面为通过墙踵的对数螺旋线滑动面, 基于能量法, 推导出了墙背倾斜、粗糙、墙后填土向上倾斜, 适用于砂性土与黏性土的主动土压力上限解。以对数螺旋线通过斜坡的旋入角 θ_0 和旋出角 θ_h 为变量, 使用基于自然选择的混合粒子群优化算法对最危险滑动面进行全局搜索, 从而获得主动土压力最优解。对于砂性土, 将土压力系数与经典的极限分析上限解相比, 发现在墙面倾角较小时两者基本一致, 但当墙面倾角大于 30° 时, 经典解明显偏小, 而文中解与基于最优性原理的极限平衡解较接近。至于黏性土, 对一工程实例进行计算, 计算结果与实测值的相对误差为5.4%。

关 键 词: 土压力; 对数螺旋线滑动面; 能量法; 粒子群算法

中图分类号: TU 443

文献标识码: A

Calculation of active earth pressure based on hybrid particle swarm algorithm and energy method

CHEN Chang-fu, TANG Ren-hua, LIANG Guan-ting

(Institute of Geotechnical Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: Assuming a log-spiral sliding surface passing through the toe of retaining wall, based on energy method, the upper bound of active earth pressure for rough walls with inclined backfill is formulated. The formula can be applied to sandy soil and cohesive soil. Extracting the screw-in angle θ_0 and screw-out angle θ_h through the slope as variables, hybrid particle swarm optimization is used to search the most dangerous sliding surface globally. Hence, the optimal solution of active earth pressure is obtained. For sandy soil, the earth pressure coefficients in this work agree with the classical upper bound solutions of limit analysis when the inclination of wall is small, but obviously bigger than the classical solutions while the wall angle is larger than 30° . Compared to other well-known solutions obtained by limit equilibrium based on optimum principle, the solution herein is more approximate than that of the classical upper bound solution. For cohesive soil, employing the formula developed by this work to calculate the active earth pressure in an engineering practice, it is found that the relative error between calculation results and measured data is 5.4%.

Key words: earth pressure; logarithmic spiral sliding surface; energy method; particle swarm algorithm

1 引 言

自 Terzaghi^[1]使用对数螺旋线滑动面模型求解挡土墙土压力后, 此模型经历了几十年试验和实践的考证, 被普遍认为是最接近实际的破坏机构^[2]。Chen^[3]较早地系统研究了极限分析法在土压力中的应用, 随后许多学者运用塑性极限上限方法来计算土压力, 取得了较多成果。范文等^[4]和杨建民^[5]利用多三角形破坏机构, 分别基于统一强度理论和非线性强度准则求得了土压力的上限解。杨小礼^[6]运用非线性强度准则分析了墙后填土面水平时动、静

主动土压力上限解。Chen^[3]分别采用 6 种破坏机构结合最速下降法求得了土压力系数, 其中 2 条直线中间夹对数螺旋线破坏机构的计算结果与广泛接受的 Sokoloski^[7]解误差最小, Chen 认为, 是对数螺旋线夹层起到了关键作用。但上述机构假定对数螺旋线的中心固定于坡顶不变, 而实际情况并非如此。本文采用接近实际情况的单纯对数螺旋线滑动面破坏机构, 不约束对数螺旋线中心的位置, 推导出土压力及其系数计算公式, 然后运用基于自然选择的混合粒子群算法对最危险滑动面进行全局搜索并计算主动土压力, 最后将本文方法计算结果与已有解答和实测值

进行对比分析。

2 基于能量法和対数螺线滑裂面的主动土压力计算

能量法计算土压力需用到以下两个结论^[8]:

(1) 流动法则: 土体处于塑性流动或剪切滑动状态时, 滑动面上任一点的应变速度矢量 v 与该点处的滑动线成 φ 角。

(2) 土体在塑性流动中的能量消散为 $cvc\cos\varphi$ 。 c 、 φ 分别为土体的黏聚力和内摩擦角。

如图 1 所示的挡土墙, 墙高为 H , 墙背与水平面成 β 角, 墙后填土与水平面成 α 角。填土上作用均布荷载 q 。以坡顶处 A 点为坐标原点, 向左和向上分别定为 x , y 坐标轴的正方向。

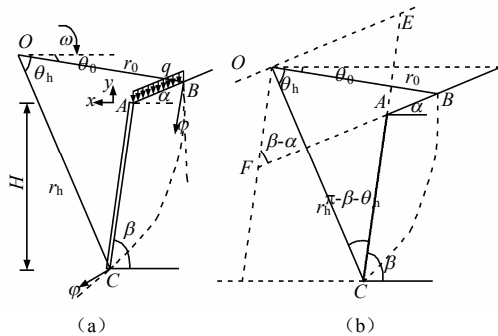


图 1 对数螺线滑动面计算图

Fig.1 Calculation diagram of log-spiral sliding surface

假定滑动面为通过墙底的对数螺线滑动面, 其动径方程为

$$r_\theta = r_0 e^{(\theta - \theta_0) \tan \varphi} \quad (1)$$

式中: r_θ 为 r_0 绕中心旋转 θ 角后的动径长度(m); θ_0 为 r_0 与水平面的夹角($^\circ$); r_0 为对数螺线通过边坡的旋出点到螺线中心的长度(m)。

当 $\theta = \theta_h$ 时,

$$r_h = r_0 e^{(\theta_h - \theta_0) \tan \varphi} \quad (2)$$

式中: r_h 为对数螺线通过边坡的旋出点至螺线中心的长度(m); θ_h 为 r_h 与水平面的夹角($^\circ$)。

过 O 点作 AB 的平行线与 CA 的延长线交于点 E ; 作 AC 的平行线与 BA 的延长线交于点 F , 则

$$\left. \begin{aligned} H &= (\overline{CE} - \overline{AE}) \sin \beta = (\overline{CE} - \overline{OF}) \sin \beta \\ L &= \overline{AB} = \overline{BF} - \overline{AF} = \overline{BF} - \overline{OE} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

由式 (3) 可以推出

$$\left. \begin{aligned} \frac{H}{r_0} &= \frac{\sin \beta}{\sin(\beta - \alpha)} [\sin(\theta_h + \alpha) e^{(\theta_h - \theta_0) \tan \varphi} - \sin(\theta_0 + \alpha)] \\ \frac{L}{r_0} &= \frac{\sin(\theta_0 + \beta)}{\sin(\beta - \alpha)} - \frac{\sin(\theta_h + \beta)}{\sin(\beta - \alpha)} e^{(\theta_h - \theta_0) \tan \varphi} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

此外, 对数螺线参数还满足式 (5) 中的几何关系

$$\left. \begin{aligned} x_0 &= (y_0 + H) / \tan \theta_h + H / \tan \beta \\ y_0 &= r_0 (\sin \theta_0 + L / r_0 \sin \alpha) \\ x_{AB} &= r_0 \cos \theta_0 - x_0 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中: x_0 为对数螺线中心横坐标(m); y_0 为对数螺线中心纵坐标(m); L 为滑裂面起点到坡顶的距离; x_{AB} 为 L 在 x 轴负方向的投影。

作用在滑动土体上的外力有均布荷载 q , 滑动土体的重力 W 及挡土墙对滑动土体的反作用力 p 。假设滑动土体绕对数螺线中心产生微小的角速度 ω , 由假定的对数螺线方程可知, 螺线上每点的切线方向与动径成 $(\pi/2 + \varphi)$ 角, 结合流动法则, 则滑动面上每点的应变速度方向均与动径垂直, 即

$$v_\theta = r_\theta \omega = r_0 e^{(\theta - \theta_0) \tan \varphi} \omega \quad (6)$$

如图 2、3 所示, 由于超载和重力的方向都是竖直向下, 故其与速度方向夹角等于动径与水平线的夹角。即超载或重力做的功等于力与角速度 ω 的乘积, 再乘以超载或者单元土体形心到对数螺线中心 O 点的水平距离。

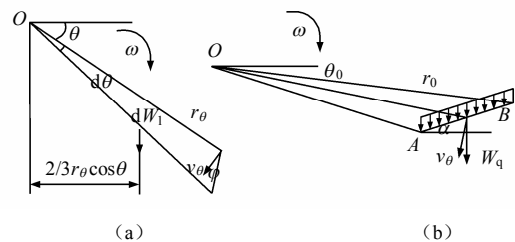


图 2 滑体发生微小转动计算图

Fig.2 Calculation diagram of small rotation on slide soil

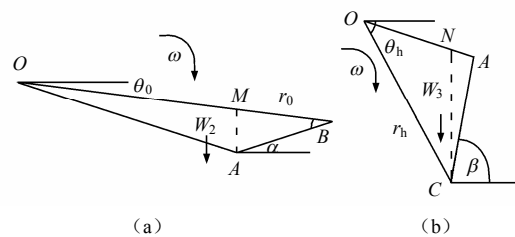


图 3 滑体发生微小转动计算图

Fig.3 Calculation diagram of small rotation on slide soil

超载 q 所作的功为

$$\begin{aligned} W_q &= qL(r_0 \cos \theta_0 - L \cos \alpha / 2) \omega = \\ &= r_0^2 q (L / r_0) [\cos \theta_0 - (L / r_0) \cos \alpha / 2] \omega \end{aligned} \quad (7)$$

如图 4 所示, 滑动土体重力作的功可由叠加法求出。以 W_1 表示 OBC 对假定转动中心 O 作的功, W_2 表示 OAB 对假定转动中心 O 作的功, W_3 表示 OAC 对假定转动中心 O 作的功。 OAB 形心到 O 点

的水平距离可由 OAM 与 ABM 组合求出, OAC 形心到 O 点的水平距离可由 OCN 与 ACN 组合求出。则 W_1 , W_2 , W_3 分别为

$$\begin{aligned} dW_1 &= \omega \gamma (2/3 r_0 \cos \theta) (1/2 r_0^2 d\theta) \\ W_1 &= \gamma r_0^3 \omega / 3 \int_{\theta_0}^{\theta_h} e^{3(\theta-\theta_0) \tan \varphi} \cos \theta d\theta = \\ &= \frac{[(3 \tan \varphi \cos \theta_h + \sin \theta_h) e^{3(\theta_h-\theta_0) \tan \varphi} - 3 \tan \varphi \cos \theta_0 - \sin \theta_0]}{3(1+9 \tan^2 \varphi) / (\gamma r_0^3 \omega)} \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} W_2 &= \gamma r_0 L \omega \sin(\theta_0 + \alpha) (2r_0 \cos \theta_0 - L \cos \alpha) / 6 = \\ &= \gamma r_0^3 \omega (L / r_0) \sin(\theta_0 + \alpha) (2 \cos \theta_0 - L / r_0 \cos \alpha) / 6 \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} W_3 &= \frac{\gamma r_h \sin(\theta_h + \beta) (H / \sin \beta) \omega}{2} \cdot \\ &= \frac{[r_0 \cos \theta_0 - L \cos \alpha + r_h \cos \theta_h]}{3} \cdot \\ &= \frac{\gamma r_0^3 \omega}{6} e^{(\theta_h-\theta_0) \tan \varphi} \left[\frac{H \sin(\theta_h + \beta)}{r_0 \sin \beta} \right] \cdot \\ &= \left[\cos \theta_0 - \frac{L}{r_0} \cos \alpha + \cos \theta_h e^{(\theta_h-\theta_0) \tan \varphi} \right] \end{aligned} \quad (10)$$

沿对数螺线微分长度 $r_0 d\theta / \cos \varphi$ 上的消耗功为 $(r_0 d\theta / \cos \varphi) c v \cos \varphi = c r_0 v d\theta$, 内部总消耗功为

$$W_i = \int_{\theta_0}^{\theta_h} c r_0 v d\theta = \frac{c r_0^2 \omega}{2 \tan \varphi} (e^{2(\theta_h-\theta_0) \tan \varphi} - 1) \quad (11)$$

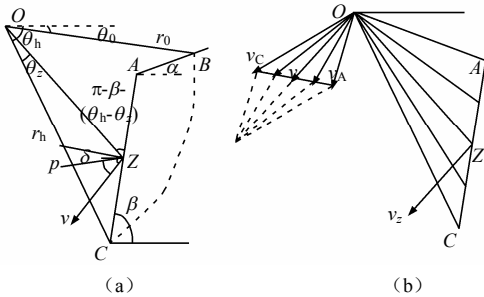


图4 AC面上单元土体速度矢量图

Fig.4 Soil element's velocity vector on surface AC

如图4(a), 由余弦定理知

$$\overline{OZ} = \sqrt{r_h^2 + \overline{CZ}^2 - 2r_h \overline{CZ} \cos(\pi - \beta - \theta_h)} \quad (12)$$

将 $\overline{CZ} = H / (2 \sin \beta)$ 代入式(12), 得

$$\overline{OZ} = \sqrt{r_h^2 + H^2 / (4 \sin^2 \beta) - r_h H \cos(\beta + \theta_h) / \sin \beta} \quad (13)$$

由正弦定理知

$$\theta_z = A = \sin^{-1} [G / \sqrt{J + 1 / (4 \sin^2 \beta) - U}] \quad (14)$$

式中: $A = \sin^{-1} [H \sin(\beta + \theta_h) / (2 \overline{OZ} \sin \beta)]$; $G = \sin(\beta + \theta_h) / (2 \sin \beta)$; $J = (r_0 / H)^2 e^{2(\theta_h-\theta_0) \tan \varphi}$; $U =$

$$r_0 e^{(\theta_h-\theta_0) \tan \varphi} \cos(\beta + \theta_h) / H \sin \beta.$$

图4(b)右为AC面上单元土体速度矢量合成图, 可见其平均速度即为中点Z处的速度。土压力合力 P 与墙面法线夹角为 δ (外摩擦角), 位于法线下方, 与Z点速度方向夹角为 $\pi - (\theta_h - \theta_z) - \beta - \delta$, 则挡土墙对AC面土体的反力所做功为

$$W_p = p \cos(\pi - \theta_h + \theta_z - \beta - \delta) r_0 e^{(\theta_h-\theta_0) \tan \varphi} \omega \quad (15)$$

由于挡土墙对土体的反力与土体的应变速率方向相反, 故其所做之功为负值。由外力作的功等于土体内部消耗的能量, 消去角速度可得:

$$W_q + W_1 - W_2 - W_3 - W_p = W_i \quad (16)$$

$$P_a = \frac{W_q + W_1 - W_2 - W_3 - W_i}{\cos(\pi - \theta_h + \theta_z - \beta - \delta) r_0 e^{(\theta_h-\theta_0) \tan \varphi} \omega} = f(\theta_0, \theta_h) \quad (17)$$

式(17)即为主动土压力计算公式。显然, 这是一个二元函数的极值问题, 对于主动土压力, 应取其最大值。

特别地, 当 $\alpha = 0^\circ$, $\beta = 90^\circ$, 即墙背竖直、墙后填土面水平时, 整理公式后可得:

$$P_a = P_{ay} - P_{ac} + P_{aq} \quad (18)$$

$$P_{ay} = k_{ay} \gamma H^2 / 2; P_{ac} = k_{ac} c H; P_{aq} = k_{aq} q H \quad (19)$$

$$\begin{aligned} k_{ay} &= \frac{2(Be^{3(\theta_h-\theta_0) \tan \varphi} - C)}{3(1+9 \tan^2 \varphi) DB'^2} + \\ &= \frac{3C' - \sin \theta_0 \cos^2 \theta_0 - 2D'e^{3(\theta_h-\theta_0) \tan \varphi}}{3CB'^2} \end{aligned} \quad (20)$$

式中:

$$\begin{aligned} B &= 3 \tan \varphi \cos \theta_h + \sin \theta_h, \quad C = 3 \tan \varphi \cos \theta_0 + \sin \theta_0, \\ D &= \sin(\theta_h - \theta_z + \delta) e^{(\theta_h-\theta_z) \tan \varphi}, \quad B' = \sin \theta_h e^{(\theta_h-\theta_0) \tan \varphi} - \\ &= \sin \theta_0, \quad C' = \sin \theta_0 \cos^2 \theta_h e^{2(\theta_h-\theta_0) \tan \varphi}, \quad D' = \sin \theta_h \cos^2 \theta_h. \end{aligned}$$

$$k_{ac} = \frac{e^{2(\theta_h-\theta_0) \tan \varphi} - 1}{2 \tan \varphi DB'} \quad (21)$$

$$k_{aq} = \frac{\cos^2 \theta_0 - \cos^2 \theta_h e^{2(\theta_h-\theta_0) \tan \varphi}}{2 DB'} \quad (22)$$

不同深度处的主动土压力强度 p_H 为

$$p_H = dP / dH = \gamma H k_{ay} - c k_{ac} + q k_{aq} \quad (23)$$

主动土压力的作用点距墙底的高度为

$$y = \frac{(P_{ay} / 3 - P_{ac} / 2 + P_{aq} / 2) H}{P_a} \quad (24)$$

式中: P_a 为主动土压力, k_{ay} , k_{ac} , k_{aq} 分别为单独考虑重度, 黏聚力, 超载时的土压力系数。

3 基于混合粒子群算法主动土压力优化计算

基于能量法主动土压力计算可归结为如下优

化模型:

$$\left. \begin{aligned} X &= [x_1, x_2]^T = [\theta_0, \theta_h]^T \\ \min f(X) \\ \text{s.t. } g_1(X) &= x_1 > 0; \\ g_2(X) &= x_2 - x_1 > 0; \\ g_3(X) &= \pi - \beta - x_2 > 0; \\ g_4(X) &= x_{AB} > 0 \end{aligned} \right\} \quad (25)$$

式中: X 为优化设计变量; $f(X)$ 为目标函数, 计算土压力时 $f(X) = -P_a$, 计算土压力系数时 $f(X) = -k_{ay}$, 其中 P_a 与 k_{ay} 分别按式(17)与式(20)计算; $g_j(X)$ ($j=1, 2, 3, 4$) 为约束条件, 其中 x_{AB} 按式(5)计算。

式(25)是一个含有复杂的目标函数和约束条件的非线性规划问题, 本文采用适用性强且具有良好的全局搜索能力的粒子群算法^[9](PSO)求解。

在 PSO 算法中, 每个粒子都具有 3 个参数: 位置矢量 X , 代表目标函数中自变量的值; 速度矢量 V , 代表粒子飞翔的力向和距离, 用来引导粒子不断朝着更好的解空间改变当前位置; 适应度 $fitness$, 由被优化的目标函数决定, 目标函数值越小, 则适应度越好。在每一次迭代中, 粒子通过跟踪 2 个最优解来更新自己, 一是粒子本身所找到的最优解, 另一个是整个种群目前所找到的最优解。

混合粒子群算法是将自然选择机制与粒子群算法结合, 在每次迭代过程中将整个粒子群按适应度排序, 用群体中最好的一半的粒子的速度和位置替换最差的一半的位置和速度, 同时保留原来每个个体所记忆的历史最优值。

基于以上原理和模型, 主动土压力混合粒子群优化算法计算步骤如下:

(1) 设定粒子群数目为 40, 即 $i \in [1, 40]$ 。对每个粒子的当前位置矢量 $X^i = [x_{i,1}, x_{i,2}]$ 和速度矢量 $V^i = [v_{i,1}, v_{i,2}]$ 在变量范围内 $[0, \pi - \beta]$ 随机赋予初始值;

(2) 根据每个粒子当前的 X^i 计算其适应度。若 $g_i(X) > 0$ 成立, 则 $fitness(i) = f(X^i)$; 否则, 将一个远大于正常土压值的大数赋给适应度函数作为此粒子的适应值以使其受到惩罚, 例如 $fitness(i) = 10\ 000$;

(3) 将各微粒的位置和适应值存储在各微粒的个体最好位置 $pbest$ 中, 将所有 $pbest$ 中适应值最优个体的位置和适应值存储于群体最好位置 $gbest$ 中;

(4) 按式(26)和(27)更新每个微粒的速度和位置:

$$\begin{aligned} V^i(t+1) &= wV^i(t) + c_1r_1\{p_i - [x_{i,1}, x_{i,2}](t)\} + \\ &c_2r_2\{p_g - [x_{i,1}, x_{i,2}](t)\} \end{aligned} \quad (26)$$

$$[x_{i,1}, x_{i,2}](t+1) = [x_{i,1}, x_{i,2}](t) + V^i(t+1) \quad (27)$$

式中: t 为迭代的步数; p_i 为个体最优适应值对应的 $[x_{i,1}, x_{i,2}]$ 值, 即第 i 个粒子最优适应值对应的 $[\theta_0, \theta_h]$ 值; p_g 为群体最优适应值对应的 $[\theta_0, \theta_h]$ 值; w 为惯性权重因子, 文中取 $w=0.5$; c_1 、 c_2 为正的学习因子, 文中取 $c_1=c_2=2$; r_1 、 r_2 为 $[0, 1]$ 范围内的均匀随机数。

(5) 对每个微粒, 将其适应值与其经历过的最好适应值比较, 如果较好, 则将其对应的位置作为当前的最好位置, 然后比较当前所有 $pbest$ 和 $gbest$ 的值, 更新 $gbest$;

(6) 将整个粒子群按适应度排序, 用群体中最好的一半的粒子的速度和位置替换掉最差的一半的位置和速度, 保持 $pbest$ 和 $gbest$ 不变。

(7) 设定最大迭代次数为 100 步, 达到迭代次数后则输出结果, 即土压力最大时的 θ_0 、 θ_h 值以及土压力或者土压力系数的值。

4 结果对比分析

当墙背竖直时, 对于无超载的砂性土, 将 $c=0$, $q=0$, $\beta=90^\circ$ 代入式(20), 运用上述优化方法计算土压力系数 k_{ay} 随填土面倾角 α 的变化结果, 并与文献[3]中结果进行对比。

由表 1 知, 在不同的填土面倾角下, 本文结果与文献[3]结果几乎一致(差值在 2% 以内)。说明两者的差别对填土面倾斜角度不敏感。

当填土面水平时($\alpha=0^\circ$), 土压力系数 k_{ay} 随墙背倾角 β 的变化与文献[3]结果对比如表 2 所示。

表 1 墙背竖直时与文献[3]结果对比
Table 1 Comparison between results obtained by reference [3] and with a vertical wall

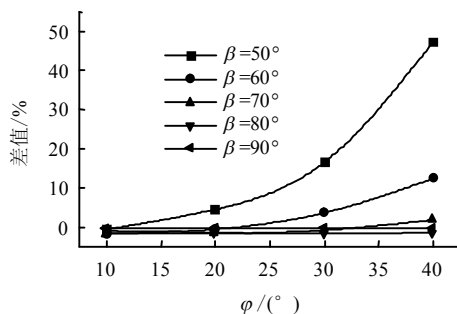
$\varphi/(^\circ)$	$\delta/(^\circ)$	$\alpha/(^\circ)$	k_{ay}		差值/%
			文献[3]	本文	
20	0	0	0.490	0.489 5	-0.10
		10	0.568	0.567 5	-0.09
		0	0.448	0.446 0	-0.45
		10	0.531	0.529 9	-0.21
		20	0.434	0.426 3	-1.77
		10	0.521	0.516 8	-0.81
	10	0	0.217	0.217 0	0.00
		10	0.237	0.237 0	0.00
		20	0.266	0.265 6	-0.15
		30	0.316	0.316 2	0.06
		0	0.200	0.199 0	-0.50
		10	0.220	0.219 7	-0.14
40	20	20	0.250	0.249 6	-0.16
		30	0.305	0.304 4	-0.20
		0	0.214	0.209 9	-1.92
		10	0.238	0.234 0	-1.68
		20	0.273	0.269 6	-1.25
		30	0.338	0.336 4	-0.47

表 2 填土面水平时与文献[3]结果对比

Table 2 Comparison between results obtained reference [3] and with horizontal backfills

$\beta/(^{\circ})$	$\varphi/(^{\circ})$	$\delta/(^{\circ})$	k_{ay}		差值 /%
			文献[3]	本文	
90	10	0	0.704	0.703 0	-0.14
		5	0.664	0.661 2	-0.42
		10	0.642	0.633 7	-1.29
	20	0	0.490	0.489 5	-0.10
		10	0.448	0.446 0	-0.45
		20	0.434	0.426 3	-1.77
	30	0	0.333	0.332 7	-0.09
		15	0.302	0.300 9	-0.36
		30	0.303	0.296 8	-2.05
	40	0	0.217	0.217 0	0.00
		20	0.200	0.199 0	-0.50
		40	0.214	0.209 9	-1.92
80	10	0	0.669	0.667 9	-0.16
		5	0.626	0.619 8	-0.99
		10	0.600	0.586 6	-2.23
	20	0	0.434	0.432 6	-0.32
		10	0.391	0.385 4	-1.43
		20	0.372	0.360 7	-3.04
	30	0	0.272	0.270 7	-0.48
		15	0.242	0.237 7	-1.78
		30	0.236	0.228 2	-3.31
	40	0	0.160	0.159 1	-0.56
		20	0.143	0.141 0	-1.40
		40	0.148	0.143 7	-2.91
70	10	0	0.649	0.646 5	-0.39
		5	0.601	0.590 5	-1.75
		10	0.569	0.551 7	-3.04
	20	0	0.385	0.384 8	-0.05
		10	0.341	0.335 2	-1.70
		20	0.319	0.308 3	-3.35
	30	0	0.216	0.217 9	0.88
		15	0.188	0.186 5	-0.80
		30	0.179	0.175 3	-2.07
	40	0	0.109	0.112 2	2.94
		20	0.095	0.096 7	1.79
		40	0.095	0.096 1	1.16
60	10	0	0.641	0.641 0	0.00
		5	0.586	0.575 6	-1.78
		10	0.549	0.531 0	-3.28
	20	0	0.341	0.344 1	0.91
		10	0.295	0.293 3	-0.58
		20	0.270	0.265 5	-1.67
	30	0	0.165	0.171 1	3.70
		15	0.138	0.143 0	3.62
		30	0.127	0.132 0	3.94
	40	0	0.065	0.072 2	11.08
		20	0.054	0.060 7	12.41
		40	0.052	0.058 9	13.27
50	10	0	0.641	0.650 4	1.47
		5	0.577	0.573 4	-0.62
		10	0.533	0.522 0	-2.06
	20	0	0.290	0.304 5	5.00
		10	0.243	0.254 0	4.53
		20	0.217	0.226 2	4.24
	30	0	0.108	0.124 3	15.09
		15	0.087	0.101 4	16.55
		30	0.078	0.091 7	17.56
	40	0	0.024	0.034 4	43.33
		20	0.019	0.028 0	47.37
		40	0.017	0.026 3	54.71

从表 2 中选择部分数据绘成更直观的图 5。

图 5 填土面水平时差值随墙面倾角的变化($\delta=\varphi/2$)Fig.5 Difference varying with wall angle for horizontal backfills($\delta=\varphi/2$)

从图可以看出,当墙面与水平面的夹角为 90° 、 80° 、 70° 时,两者差值接近于 0。而当墙背向内倾斜角度大于 30° 时,两者存在明显的差别,尤其是填土摩擦角较大时,本文比文献[3]的计算结果大 50%左右。将两者结果与朱大勇等^[10]的极限平衡解对比如表 3 所示。

表 3 墙背向内倾斜 30° 时土压力系数对比Table 3 Comparison of active earth pressure coefficients while the wall angle is 30°

$\varphi/(^{\circ})$	$\delta/(^{\circ})$	文献[10] 结果	本文		文献[3]		库伦	
			结果	误差/%	结果	误差/%	结果	误差/%
30	0	0.180	0.171 1	-4.94	0.165	-8.33	0.155	-13.9
	15	0.156	0.143 0	-8.33	0.138	-11.54	0.127	-18.6
	30	0.149	0.132 0	-11.41	0.127	-14.77	0.114	-23.5
40	0	0.076	0.072 2	-5.00	0.065	-14.47	0.059	-22.4
	20	0.064	0.060 7	-5.16	0.054	-15.63	0.048	-25.0
	40	0.063	0.058 9	-6.51	0.052	-17.46	0.046	-27.0

从表 3 中可以看出,当墙背倾角较大时,本文比文献[3]更接近文献[10]的计算结果,笔者认为这是由不同的破坏机构导致的。由于文献[3]没有对对数螺线中心进行搜索,所以在一些特定情况下不能搜索到土压力系数的最优值(最大值),从而小于实际值。显然,此时的库伦理论精度更小,因为墙背倾角较大时,真实滑动面与平面滑动面的假定存在较大的差异。

5 实例验证

四川建筑科学研究所四川简阳做的重力式挡土墙试验^[11]:墙背竖直,墙高为 4 m,土天然重度 $\gamma=19.34 \text{ kN/m}^3$,不排水三轴快剪指标 $\varphi=16.63^{\circ}$ 、 $\delta=8.32^{\circ}$ 、 $c=4.7 \text{ kPa}$ 。

计算结果见表 4。同时给出了建筑地基基础规范^[12]推荐方法的计算结果与实测结果。

表 4 本文计算结果
Table 4 Result of the article

x_o/m	y_o/m	x_j/m	$\theta_h/(^\circ)$	$\theta_o/(^\circ)$	$P_a/(kN/m)$
263.79	381.87	3.21	55.64	55.04	52.93

表 5 本文计算结果与实测值对比
Table 5 Comparison of results obtained by the article and measured date

实测值 /(kN/m)	本文		规范	
	结果 /(kN/m)	误差 /%	结果 /(kN/m)	误差 /%
55.97	52.926	-5.4	75.91	35.6

显然，本文对黏性土的计算结果比规范推荐方法计算结果更接近实测值。

6 结 论

(1) 本文基于能量法和混合离子群优化算法，假定滑动面为对数螺旋线滑裂面，得到了一种新的主动土压力及其系数计算方法。

(2) 对于黏性土，通过与一重力式挡墙试验结果对比分析发现，本文结果与实测值误差仅为 5.4%，表明本文方法计算结果可靠。

(3) 对于无超载砂性土的土压力系数，本文方法计算结果与经典的极限分析上限解在墙面倾角较小时基本一致，但当墙面倾角较大时，经典解明显偏小，与本文解最大差别达 54.71%，而本文解与基于最优性原理的极限平衡解较接近。

参 考 文 献

[1] TERZAGHI K. Theoretical soil mechanics[M]. New York: [s. n.], 1943.

[2] 赵树德, 赵树惠. 用对数螺旋线滑动面计算挡土墙主动土压力[J]. 西安建筑科技大学学报, 2002, 34(4): 342—345.

ZHAO Shu-de, ZHAO Shu-hui. Calculation of earth pressure of active retaining wall with logarithmic spiral

sliding surface[J]. Xi'an Univ. of Arch.& Tech., 2002, 34(4): 342—345.

[3] CHEN W F. Limit analysis and soil plasticity[M]. New York: Elsevier Scientific Publishing Company, 1975.

[4] 范文, 沈珠江, 愈茂宏. 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, 27(10): 1147—1153.

FAN Wen, SHENG Zhu-jiang, YU Mao-hong. Upper-bound limit analysis of earth pressure based on unified strength theory[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(10): 1147—1153.

[5] 杨建民. 基于非线性破坏准则的主动土压力上限计算[J]. 岩土力学, 2009, 30(2): 503—508.

YANG Jian-min. Upper bound solution for active earth pressure based on a nonlinear failure criterion[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(2): 503—508.

[6] YANG Xiao-li. Upper bound limit analysis of active earth pressure with different fracture surfaces and nonlinear yield criterion[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2007, 47(1): 46—56.

[7] SOKOLOSKII V V. Statics of granular media[M]. New York: Pergamon Press, 1965.

[8] 顾慰慈. 挡土墙土压力计算手册[M]. 北京: 中国建材出版社, 2005.

[9] 龚纯, 王正林. 精通 Matlab 最优化计算[M]. 北京: 电子工业出版社, 2009.

[10] 朱大勇, 钱七虎. 极限平衡法计算土压力系数的新途径[J]. 土木工程学报, 2002, 33(1): 63—68.

ZHU Da-yong, QIAN Qi-hu. New approach for computation of earth pressure coefficients based on limit equilibrium method[J]. China Civil Engineering Journal, 2002, 33(1): 63—68.

[11] 四川省建筑科学研究院. 重力式挡土墙的试验研究[R]. 成都: 四川省建筑科学研究院, 1982.

[12] 中华人民共和国国家标准. 建筑地基基础设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.