

文章编号:1001-5132(2009)02-0281-04

# 层状填土主动土压力计算方法的改进

郑林达

(浙江省电力建设有限公司, 浙江 宁波 315010)

**摘要:** 针对现有层状填土主动土压力计算方法中存在的局限性和不合理性, 对原有计算方法进行了拓展和改进. 在平面滑裂面假设下, 充分考虑墙后分层填土的滑动变形协调条件以及墙背倾斜、填土表面有附加荷载、填土黏聚力、填土与挡土墙背接触面上的黏着力等一般情况, 建立分层填土的主动土压力关于滑裂面倾角的计算表达式, 有效地改进了分层法, 增加了实用性, 为工程中挡土墙土压力设计提供了更为合理、有效的方法.

**关键词:** 挡土墙; 分层填土; 主动土压力

中图分类号: TU432

文献标识码: A

在工程中, 挡土墙后分层填土是常见的. 对于墙后土压力计算, 目前一般采用库仑土压力或朗肯土压力原理. 对于多层填土的挡土墙工程设计, 常采用等效法和分层计算法. 当墙后土层的填土性质变化不大时, 可以采用等效法计算. 将填土的黏聚力参数  $c$  和内摩擦角参数  $\varphi$  取为各土层土体参数的加权平均值, 再把土层视为均质土体进行计算. 该方法虽然概念清晰, 但是误差较大, 而且偏差的大小和安全与否比较模糊. 当土层性质变化较大时, 一般采用分层计算法. 在工程设计中, 一般认为分层法比较精确, 有较高的可行性. 分层法的主要思想是将计算土层以上的土层对计算土层产生的竖向土压力与地面荷载相加, 再把该荷载当作是匀布荷载加在计算土层上. 该方法可以用来求解墙背竖直, 填土表面水平时的土压力值. 但工程中挡土墙墙背往往不是竖直的, 填土表面也不为水平, 且表面还会有附加荷载. 因此, 普通

的分层法有很大的局限性. 笔者针对这一现状, 通过理论研究和数据分析, 对计算层状填土的主动土压力的分层法进行改进, 使其能够应用于一般情况下的挡土墙, 大大增加了分层法的实用性, 为工程中挡土墙土压力设计提供了更为合理、有效的方法.

## 1 公式推导

### 1.1 基本假定

- (1) 土体处于极限状态, 各土层的破裂体沿着破裂面有滑动趋势.
- (2) 填土破坏是在平动模式下发生的, 即采用平面破裂面假设.
- (3) 填土 1 和填土 2 间的竖向作用力为  $P$ , 忽略填土间的横向作用力.
- (4) 土体遵循摩尔 - 库仑屈服准则和服从相

关联的流动法则。

(5) 挡土墙墙背与水平面夹角为  $\theta$ , 填土表面与水平面夹角为  $\beta$ , 填土 1 和填土 2 的破坏面与水平面夹角分别为  $\alpha_1$  和  $\alpha_2$ ,  $c_1$ 、 $c_3$  为墙背与填土 1 和填土 2 间黏着力,  $c_2$ 、 $c_4$  分别为填土 1 和填土 2 的黏聚力,  $\varphi_1$ 、 $\varphi_3$  为墙背对填土 1 和填土 2 的摩擦角,  $\varphi_2$ 、 $\varphi_4$  分别为填土 1 和填土 2 的内摩擦角, 填土 1 的重度为  $\gamma_1$ , 填土 2 的重度为  $\gamma_2$ , 填土表面有均布荷载  $q$ 。

## 1.2 模型建立和公式推导

建立双层土模型如图 1 所示。考虑粘性土表面出现裂缝的情况, 设裂缝深度为  $Z_0$ , 形成图示  $AA'BECG$  的滑动体。

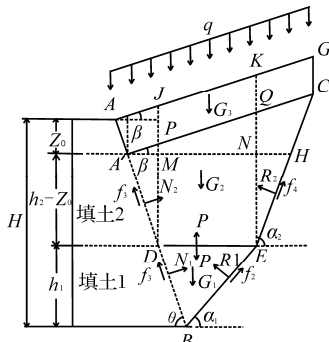


图1 主动土压力模型

裂缝深度可按式(1)求出:

$$Z_0 = 2c_4 / (\gamma_2 \sqrt{k_{a2}}) - q / r_2, \quad (1)$$

式中:  $k_{a2}$  为填土 2 的朗肯主动土压力系数, 其公式为:

$$k_{a2} = \tan^2(\pi/4 - \varphi_4/2).$$

当  $Z_0 < 0$  时, 取  $Z_0 = 0$ 。

根据图 1 几何关系可以得到:

$$\begin{aligned} \overline{BD} &= h_1 / \sin \theta, \quad \overline{BE} = h_1 / \sin \alpha_1, \\ \overline{A'D} &= (h_2 - Z_0) / \sin \theta, \quad \overline{EH} = (h_2 - Z_0) / \sin \alpha_2, \\ \overline{DE} &= \overline{BE} \sin(\theta + \alpha_1) / \sin \theta, \\ \overline{A'H} &= \overline{DE} + (\cot \theta + \cot \alpha_2)(h_2 - Z_0), \\ \overline{A'C} &= \overline{A'H} \sin \alpha_2 / \sin(\alpha_2 - \beta), \\ \overline{HC} &= \overline{A'H} \sin \beta / \sin(\alpha_2 - \beta), \\ \overline{EC} &= \overline{HC} + \overline{EH}. \end{aligned}$$

对滑动土体  $AA'BECG$  进行受力分析, 得到:

(1) 土体自重  $G_1$ 、 $G_2$ 、 $G_3$  及土表面作用的均布荷载  $Q$ , 根据几何关系可以得到:

$$\begin{aligned} G_1 &= \gamma_1 S_{\triangle BDE} = \gamma_1 \times (1/2) \overline{BD} \cdot \overline{BE} \sin(\theta + \alpha), \\ G_2 &= \gamma_2 (S_{\triangle AA'HC} + S_{\square A'DEH}) = \gamma_2 (1/2 \overline{A'H} \cdot \\ &\quad \overline{HC} \sin \alpha_2 + 1/2 (\overline{DE} + \overline{A'H})(h_2 - Z_0)), \\ G_3 &= \gamma_2 Z_0 \overline{A'C} \cos \beta, \quad Q = q \overline{A'C} \cos \beta. \end{aligned}$$

(2) 设墙背  $AB$  与填土 1 与填土 2 之间的法向反力分别为  $N_1$ 、 $N_2$ , 其相应的摩擦阻力:

$$\begin{aligned} f_1 &= c_1 \overline{BD} + N_1 \tan \varphi_1 = c_1 h_1 / \sin \theta + N_1 \tan \varphi_1, \\ f_3 &= c_3 \overline{DA} + N_2 \tan \varphi_3 = c_3 (h_2 - Z_0) / \sin \theta + N_2 \tan \varphi_3. \end{aligned}$$

(3) 设滑裂面  $BEC$  上的法向反力为  $R_1$  和  $R_2$ , 相应的摩擦阻力:

$$\begin{aligned} f_2 &= c_2 \overline{BE} + R_1 \tan \varphi_2 = c_2 h_1 / \sin \alpha_1 + R_1 \tan \varphi_2, \\ f_4 &= c_4 \overline{EC} + R_2 \tan \varphi_4. \end{aligned}$$

可分别建立竖直和水平方向上静力平衡方程:

$$N_1 \cos \theta + R_1 \cos \alpha_1 + f_1 \sin \theta + f_2 \sin \alpha_1 = G_1 + P, \quad (2)$$

$$N_1 \sin \theta - R_1 \sin \alpha_1 - f_1 \cos \theta + f_2 \cos \alpha_1 = 0, \quad (3)$$

$$N_2 \cos \theta + R_2 \cos \alpha_2 + f_3 \sin \theta + f_4 \sin \alpha_2 =$$

$$G_2 + G_3 + Q - P, \quad (4)$$

$$N_2 \sin \theta - R_2 \sin \alpha_2 - f_3 \cos \theta + f_4 \cos \alpha_2 = 0, \quad (5)$$

其中:  $P = \gamma_2 S_{\square DEKJ} = \gamma_2 (1/2 (\overline{DJ} + \overline{EK}) \overline{DE})$ 。

当取土层 1 的  $DBE$  部分土体为隔离体时, 考虑到上部挡土墙对上部土体作用有一个向上的力和一个水平力。右上方土体对填土 2 的  $A'DEC$  部分作用也有一个向上的力和一个水平力。因此我们近似用  $DJKE$  部分土体的自重来代替两土层间的竖向作用力  $P$ 。近似认为  $AA'DJ$ 、 $KECG$  部分土体的重力由上部挡土墙和右上方土体承担。然后利用一般情况下主动土压力公式计算各层主动土压力, 最后求得总的主动土压力。

根据式(1)~(4)可以推出:

$$\begin{aligned} N_1 &= (G_1 + P - c_1 h_1 - c_2 h_1 + \cot(\alpha_1 - \varphi_2)(c_1 h_1 \cot \theta - \\ &\quad c_2 h_1 \cot \alpha_1)) / (\cos \theta + \tan \varphi_1 \sin \theta + \\ &\quad \cot(\alpha_1 - \varphi_2)(\sin \theta - \tan \varphi_1 \cos \theta)), \quad (6) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} R_1 &= (N_1 \sin \theta - (c_1 h_1 / \sin \theta + N_1 \tan \varphi_1) \cos \theta + \\ &\quad c_2 h_1 \cot \alpha_1) / (\sin \alpha_1 - \tan \varphi_2 \cos \alpha), \quad (7) \end{aligned}$$

$$N_2 = (G_2 + G_3 + Q - P - c_3(h_2 - Z_0) + \cot(\alpha_2 - \varphi_4) \cdot (c_3(h_2 - Z_0) \cot \theta - c_4 EC \cot \alpha_2) - c_4 EC \sin \alpha_2) / (\cos \theta + \tan \varphi_1 \sin \theta + \cot(\alpha_1 - \varphi_2)(\sin \theta - \tan \varphi_1 \cos \theta)), \quad (8)$$

$$R_2 = (N_2 \sin \theta - c_3(h_2 - Z_0) \cot \theta - N_2 \tan \varphi_3 \cos \theta + c_4 EC \cos \alpha_2) / (\sin \alpha_2 - \tan \varphi_4 \cos \alpha_2), \quad (9)$$

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. 当墙后 2 层填土随挡土墙前移或绕墙底转动, 墙后土体以同一滑动速度  $V$  斜向下滑动, 如图 2 所示, 则有  $\alpha_2 = \alpha_1 - \varphi_2 + \varphi_4$ , 这样才能保证墙后 2 层土以同一速度斜向下滑动, 从而自然也满足了墙后 2 层填土的变形协调条件.

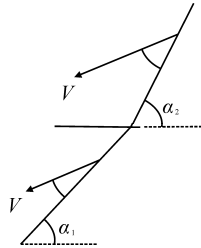


图 2 服从相关流动法则时填土的运动形式

挡土墙的总主动土压力:

$$P_a = \sqrt{(N_1 + N_2)^2 + (f_1 + f_3)^2}, \quad (10)$$

式(10)即为分层填土主动土压力的求解表达式.

在所有可能的滑裂面  $BEC$  的坡角  $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$  取值中, 真实的  $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$  取值应使得主动土压力为最大值. 下面通过一个具体的例子说明  $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$  的确定和主动土压力的计算过程.

任取一组参数  $\beta=10^\circ$ ,  $\theta=85^\circ$ ,  $\varphi_1=10^\circ$ ,  $\varphi_2=24^\circ$ ,  $\varphi_3=20^\circ$ ,  $\varphi_4=30^\circ$ ,  $\gamma_1=18.0 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-3}$ ,  $\gamma_2=18.6 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-3}$ ,  $c_1=5 \text{ kPa}$ ,  $c_2=10 \text{ kPa}$ ,  $c_3=13 \text{ kPa}$ ,  $c_4=20 \text{ kPa}$ ,  $H=10 \text{ m}$ ,  $h_1=4 \text{ m}$ ,  $q=10 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$ . 可得到  $P_a - \alpha_1$  曲线. 从

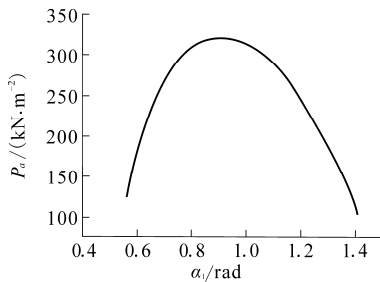


图 3 双层土主动土压力  $P_a - \alpha_1$  曲线

图 3 可以看出, 当  $\alpha_1 = 0.91 \text{ rad}$  ( $52.2^\circ$ ) 时, 主动土压力  $P_a$  取得极大值.

### 1.3 与单层土主动土压力比较

当参数  $\varphi_1 = \varphi_3$ ,  $\varphi_2 = \varphi_4$ ,  $\gamma_1 = \gamma_2$ ,  $c_1 = c_3$ ,  $c_2 = c_4$  时, 填土 1 和填土 2 性质相同, 即挡土墙后为同一填土. 此时,  $\alpha_1 = \alpha_2$ ,  $h = h_1 + h_2 - z_0$ . 代入式(6)和(8), 可以得到:

$$N = N_1 + N_2 = (G_1 + G_2 + G_3 + Q - c_1 h) / (\cos \theta + \tan \varphi_1 \sin \theta + \cot(\alpha_1 - \varphi_2)(\sin \theta - \tan \varphi_1 \cos \theta)) + (-c_2(BE + EC) \sin \alpha + \cot(\alpha - \varphi_2)(c_1 h \cot \theta - c_2(BE + EC) \cdot \cot \alpha)) / (\cos \theta + \tan \varphi_1 \sin \theta + \cot(\alpha_1 - \varphi_2)(\sin \theta - \tan \varphi_1 \cos \theta)), \quad (11)$$

$$f = f_1 + f_3 = c_1 H / \sin \theta + (N_1 + N_2) \tan \varphi_1, \quad (12)$$

此时, 挡土墙主动土压力为:

$$P_a = \sqrt{(N_1 + N_2)^2 + (f_1 + f_3)^2} = \sqrt{N^2 + f^2}. \quad (13)$$

而根据文献[1]单层土的主动土压力公式为: 式(14)~(16).

$$N = (G_1 + G_2 + G_3 - c_1 h - c_2 \overline{BC} \sin \alpha) / (\cos \theta + \tan \varphi_1 \sin \theta + \tan(\eta + \varphi_2)(\sin \theta - \tan \varphi_1 \cdot \cos \theta)) + (\cot(\alpha - \varphi_2)(c_1 h \cot \theta - c_2 \overline{BC} \cdot \cos \alpha)) / (\cos \theta + \tan \varphi_1 \sin \theta + \tan(\eta + \varphi_2) \cdot (\sin \theta - \tan \varphi_1 \cos \theta)), \quad (14)$$

$$f = c_1 H / \sin \theta + N \tan \varphi_1, \quad (15)$$

$$P_a = \sqrt{N^2 + f^2}. \quad (16)$$

通过对比式(11)~(16), 可以看出两者的主动土压力表达式完全一致. 因此, 可以得出当挡土墙后 2 层填土的性质相同时, 双层土的主动土压力公式可以退化为单层土的主动土压力公式, 即单层土主动土压力是双层土主动土压力在简单条件下的特例.

## 2 算例研究

算例 某挡土墙墙背竖直, 墙后有 2 层无粘性土, 填土表面水平无附加荷载, 各参数取值为  $h=3 \text{ m}$ ,

$h_2=7\text{ m}$ ,  $\gamma_1=\gamma_2=18.0\text{ kN}\cdot\text{m}^{-3}$ ,  $\varphi_2=20^\circ$ ,  $\varphi_4=30^\circ$ .

表1 算例计算结果比较

算法	$P_a/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-1})$		
	分层法	文献[2]法	作者方法
结果	269.37	250.63	249.95

通过算例可以看出,作者方法计算结果比普通分层法要小,符合我们的分析,因为普通分层法没有考虑到上部挡土墙对上部土压力向上分力,这就加大了挡土墙的负担,土压力计算结果必然偏大.通过两者的对比证明了作者方法的合理性.文献[2]的方法在挡土墙墙背竖直、填土表面水平、无附加荷载的情况下,被证明是较为精确的.而作者计算结果与其非常接近,说明作者计算方法在简单条件下是比较精确的.

### 3 结语

在平面滑裂面的条件下,通过静力平衡原理,

推导出墙背倾斜、填土表面倾斜、有附加荷载的一般情况下的主动土压力表达式.针对普通分层法在计算分层填土主动土压力时存在的缺陷,通过对土层间的作用力做适当的假定,有效地改进了分层法.这不仅减小了土压力计算值与真实值之间的误差,还大大地增加了分层法的适用范围,使其更具普遍性,在工程设计中有较强的实用性.

#### 参考文献:

- [1] 胡晓军. 粘性土主动土压力库仑精确解的改进[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(8):1 049-1 052.
- [2] 周海林, 冷伍明. 挡土墙墙背分层填土的土压力计算分析与改进[J]. 路基工程, 2000, 1:8-11.
- [3] 龚晓南. 土力学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
- [4] 蒋希雁, 宋思忠. 层状填土的主动土压力的理论与计算分析. 建筑科学, 2006, 22(6):22-24.
- [5] 顾慰慈. 挡土墙土压力计算[M]. 北京: 中国建材工业出版社, 2002.
- [6] 林智勇, 戴自航, 苏美选. 复杂条件下挡土墙主动土压力解析解[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(4):555-559.

## Improvement of Active Earth Pressure on Retaining Walls with Layered Backfills

ZHENG Lin-da

( Zhejiang Electronic Power Construction Co. Ltd., Ningbo 315010, China )

**Abstract:** Due to the limitation and illogicality identified in the current algorithms for active earth pressure of two-layered backfills, the original calculating methods have been modified in this research. Based on sliding plane hypothesis and deformation compatibility condition, a formula is derived for the calculation of active earth pressure of layered backfills with the consideration of some issues, such as the inclined back face, additional load, cohesion force on sliding plane and the adhesive force on the interface between soil and retaining wall. The proposed multi-layer method is proved to be more technically reasonable and effective for retaining wall design.

**Key words:** retaining wall; multi-layered backfills; active earth pressure

**CLC number:** TU432

**Document code:** A

( 责任编辑 史小丽 )