

关于《水工挡土墙设计规范》(SL379-2007) 有关土压力计算的商榷

黄绪红¹, 刘福臣²

¹平阴县锦水河流域水利站, 山东 济南

²山东水利职业学院, 山东 日照

Email: liu803036@126.com

收稿日期: 2020年10月28日; 录用日期: 2020年11月12日; 发布日期: 2020年11月19日

摘 要

全面分析《水工挡土墙设计规范》(SL379-2007)出现的主动土压力系数、土压力计算公式不完善、不完整、错误等问题, 推导出墙后为水平面与无限斜坡面组合时、墙后填土为有限斜坡面、墙后填土为水平面与有限斜坡面组合等3种情况下的主动土压力计算公式, 使得计算简单、明了; 分析了衡重式挡土墙衡重台主动土压力计算公式与计算简图存在的错误, 推导出正确的计算公式; 探讨了岩石坡面对土压力的影响因素, 给出了有限范围填土临界破裂角计算公式和有限填土土压力计算判别模式, 更好地用于土压力工程计算。

关键词

挡土墙, 主动土压力, 土压力系数, 有限范围填土, 商榷

Discussion on Earth Pressure Calculation in Hydraulic Retaining Wall Design Code (SL379-2007)

Xuhong Huang¹, Fuchen Liu²

¹Jinshui River Valley Water Conservancy Station in Pingyin County, Jinan Shandong

²Shandong Water Conservancy Vocational College, Rizhao Shandong

Email: liu803036@126.com

Received: Oct. 28th, 2020; accepted: Nov. 12th, 2020; published: Nov. 19th, 2020

Abstract

The problems that active earth pressure coefficient and calculation formula of earth pressure are

imperfection, incompleteness or error in hydraulic retaining wall design code (SL379-2007) are analyzed comprehensively and the formula of active Earth pressure is derived in 3 different cases when the back wall is composed by horizontal plane and infinite slope, the back wall is composed by finite slope and the back wall is composed by horizontal plane and finite slope to simplify the calculation. The calculation formula of the active earth pressure on the counterweight retaining wall is in contradiction with the calculation diagram and there are some calculation errors so we give out the right one. The influence factors of rock slope on earth pressure are discussed and the critical rupture angle formula and the discriminant model is given which can be used to guide the engineering design.

Keywords

Retaining Wall, Active Earth Pressure, Earth Pressure Coefficient, Limited Fill, Discussion

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 前言

《水工挡土墙设计规范》(SL379-2007) [1]附录 A 给出了各种情况下主动土压力系数、土压力计算图。笔者发现存在许多问题,有的是主动土压力系数计算不合理,有的是土压力计算公式不完善、不完整,有的是计算公式有缺陷,有的只给出土压力分布图,未给出具体计算式,在工程设计中,导致无法计算。

2. 挡土墙墙后填土为斜坡面、水平面与斜坡面组合时

2.1. 《水工挡土墙设计规范》计算模式

当挡土墙墙后填土为斜坡面、水平面与斜坡面组合时,《水工挡土墙设计规范》给出了主动土压力系数和土压力计算公式。

2.2. 主动土压力系数

规范附录(A.0.6-1)~(A.0.6-3)中的主动土压力系数采用了同一表达符号 K_a , 三种情况下似乎是同一个数值; 因为 $H_0 > H_d > z$, 如果主动土压力系数 K_a 相同的话, 则有 $e_{a2} > e_{a1} > e_{a3}$, 但从图 1 看出, $e_{a3} > e_{a2} > e_{a1}$, 两者相互矛盾。很显然, 规范附录(A.0.6-1)~(A.0.6-3)中应根据实际情况, 分别采用不同大小的主动土压力系数, 规范中疏忽了这个问题, 在工程设计中引起混乱, 即三个公式分别采用三个主动土压力系数 K_{a1} 、 K_{a2} 、 K_{a3} :

$$e_{a1} = \gamma H_d K_{a1} \quad (1)$$

$$e_{a2} = \gamma H_0 K_{a2} \quad (2)$$

$$e_{a3} = \gamma z K_{a3} \quad (3)$$

2.2.1. 填土面为水平时的主动土压力系数

当墙后填土为水平面时, 其主动土压力系数按下式计算:

$$K_{a1} = \tan^2(45^\circ - \phi/2) \quad (4)$$

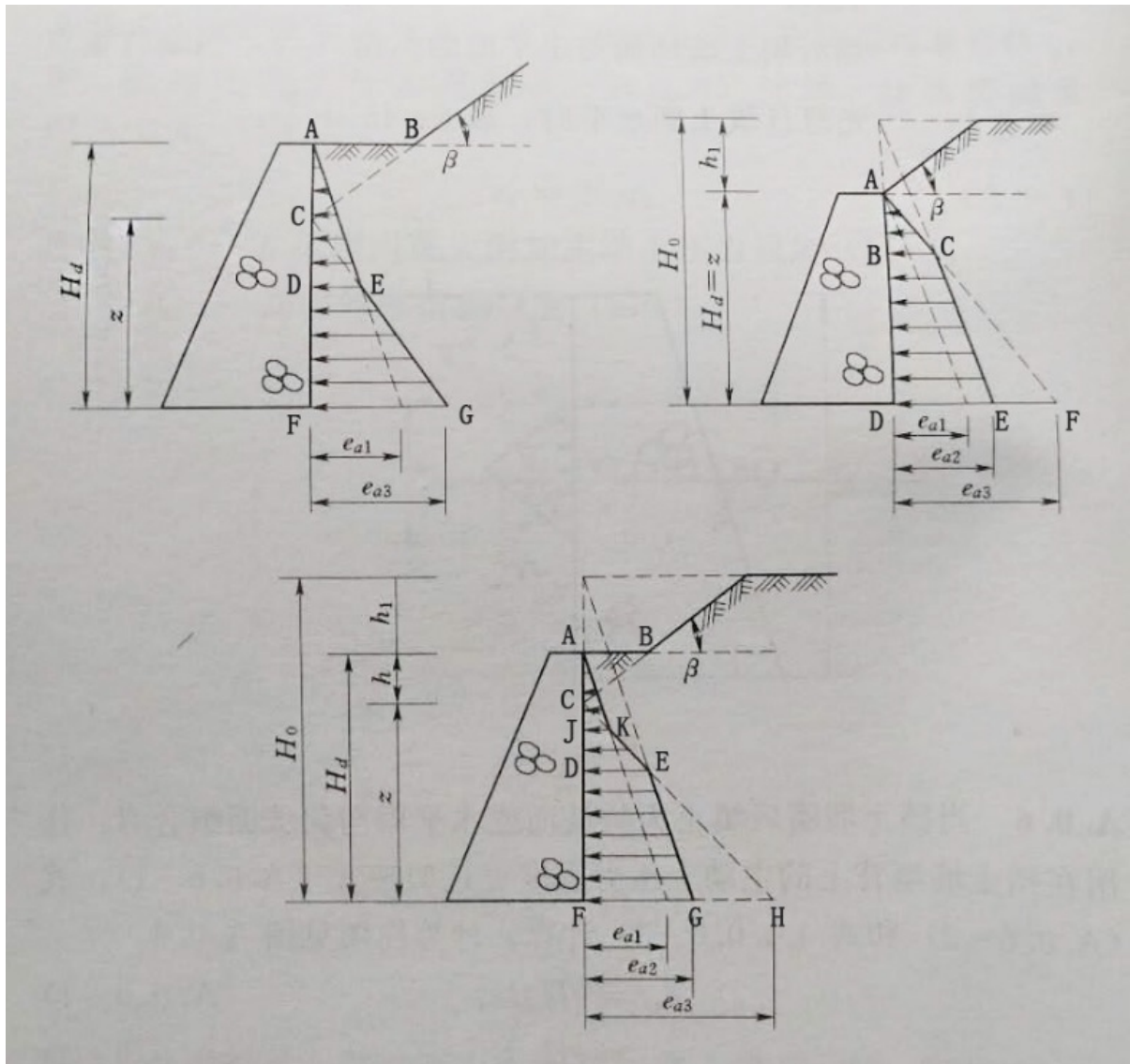


Figure 1. Calculation chart of active earth pressure when the backfill is slope or the combination of horizontal and slope
图 1. 墙后填土为斜坡面、水平面与斜坡面组合时主动土压力计算简图

2.2.2. 填土面坡角为 β 时的主动土压力系数

重力式挡土结构填土倾斜时，主动土压力系数可按下列式计算：

$$K_{a3} = \frac{\cos^2(\phi - \varepsilon)}{\cos^2 \varepsilon \cos(\varepsilon + \delta) \left[1 + \sqrt{\frac{\sin(\phi + \delta) \sin(\phi - \beta)}{\cos(\varepsilon + \delta) \cos(\varepsilon - \beta)}} \right]^2} \quad (5)$$

很显然 $K_{a2} = K_{a1} < K_{a3}$ 。

2.3. 主动土压力大小

(图 1(a))中主动土压力分布图面积大小就是主动土压力大小，但规范中没有给出具体计算公式，下面给出主动土压力计算公式。

2.3.1. 墙后为水平面与无限斜坡面组合时的土压力大小(图 1a)

设墙后填土水平段的水平距离 $AB = a$, $h = AC = a \tan \beta$, $c = CD$, $z = CF = H_d - a \tan \beta$, E 点的位置为两条土压力线交点, 由土压力强度相等求得: $\gamma(h+c)K_{a1} = \gamma c K_{a3}$, 由此解得:

$$c = \frac{K_{a1}}{K_{a3} - K_{a1}} h \quad (6)$$

则线段 $DF = H_d - h - c$; 土压力强度 $DE = \gamma c K_{a3} = \gamma(h+c)K_{a1}$, $FG = e_{a3} = \gamma z K_{a3} = \gamma(H_d - h)K_{a3}$ 。主动土压力大小为:

$$E_a = \frac{1}{2} \gamma (h+c)^2 K_{a1} + \frac{1}{2} \gamma [(H_d - h)^2 - c^2] K_{a3} \quad (7)$$

2.3.2. 墙后填土为有限斜坡面时的土压力(图 1b)

设 $AB = d$, C 点的位置为两条土压力线交点, 由土压力强度相等 $\gamma(h_1+d)K_{a2} = \gamma d K_{a3}$ 解得:

$$d = \frac{K_{a2}}{K_{a3} - K_{a2}} h_1 \quad (8)$$

则线段 $BD = H_d - d$, $BD = H_d - d$; 土压力强度 $BC = \gamma d K_{a3} = \gamma(h_1+d)K_{a2}$, $DE = e_{a2} = \gamma H_0 K_{a2}$, $DF = e_{a3} = \gamma H_d K_{a3}$, $EF = e_{a3} - e_{a2} = \gamma H_d K_{a3} - \gamma H_0 K_{a2}$ 。

三角形 ADF 面积与三角形 CEF 面积之差即为主动土压力大小:

$$E_a = \frac{1}{2} \gamma H_d^2 K_{a3} - \frac{1}{2} \gamma (H_d K_{a3} - H_0 K_{a2})(H_d - d) \quad (9)$$

2.3.3. 墙后填土为水平面与有限斜坡面组合时的土压力(图 1c)

设墙后填土水平段的水平距离 $AB = a$, $h = AC = a \tan \beta$, $c = CJ$, $d = CD$, K 点为 e_{a1} 、 e_{a3} 两条土压力线交点, E 点为 e_{a2} 、 e_{a3} 两条土压力线交点, 由土压力强度相等分别求得[2]:

$$c = \frac{K_{a1}}{K_{a3} - K_{a1}} h \quad (10)$$

$$d = \frac{K_{a2}}{K_{a3} - K_{a2}} (h + h_1) \quad (11)$$

线段 $JD = d - c$, $DF = AF - AD = H_d - h - d$; 土压力强度 $JK = \gamma(h+c)K_{a1} = \gamma c K_{a3}$, $DE = \gamma(h_1+h+d)K_{a2} = \gamma d K_{a3}$, $FG = e_{a2} = \gamma H_0 K_{a2}$ 。

主动土压力大小为三角形 AJK 、梯形 $JKDE$ 、梯形 $DEGF$ 面积之和, 即:

$$E_a = \frac{1}{2} \gamma (h+c)^2 K_{a1} + \frac{1}{2} [(\gamma(h+c)K_{a1} + \gamma d K_{a3})(d-c)] + \frac{1}{2} (\gamma d K_{a3} + \gamma H_0 K_{a2})(H_d - h - d) \quad (12)$$

主动土压力合力的作用点位置, 可根据各分力对墙底求矩, 等于合力对墙底求矩的面积矩法求得, 这里不再赘述。

3. 衡重式挡土墙土压力

3.1. 《水工挡土墙设计规范》计算模式

衡重式挡土墙的主动土压力系数按公式(附 A.0.1-4)计算, 衡重台以上、以下的主动土压力分别按公式(附 A.0.8-1)、(附 A.0.8-2)计算(图 2), 其主动土压力强度图形的折点深度可按公式(附 A.0.8-3)、(附 A.0.8-4)计算。

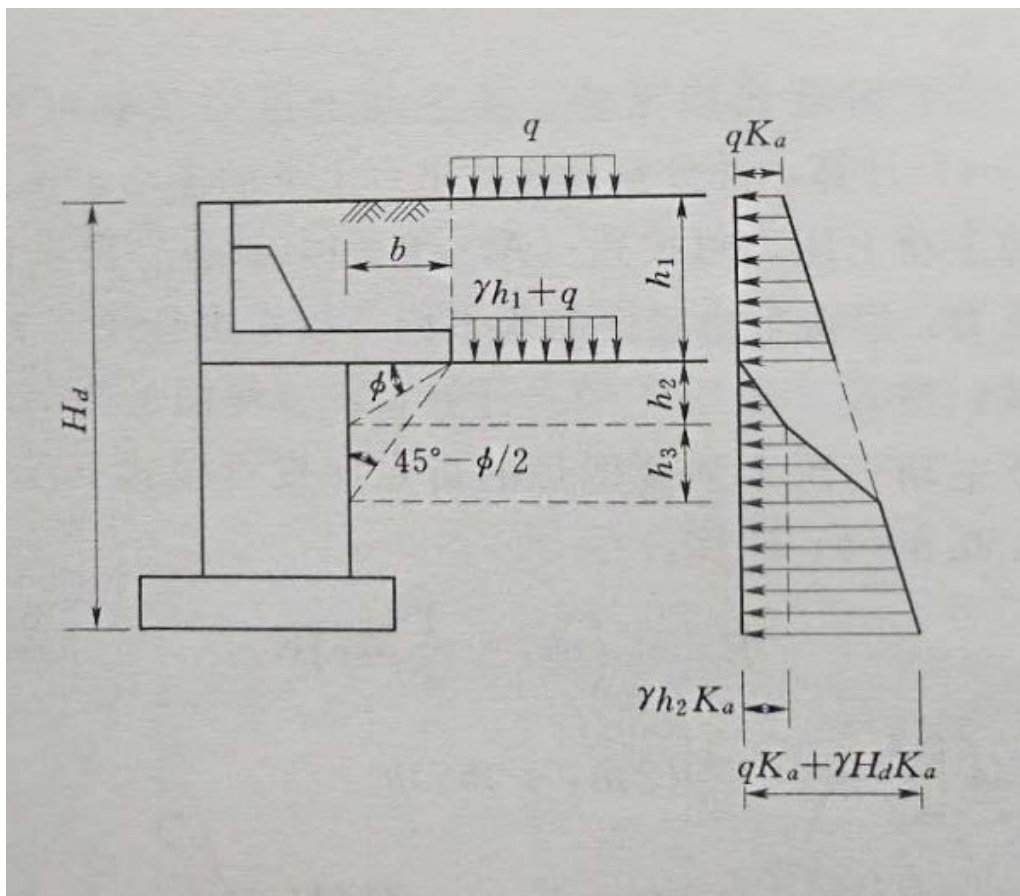


Figure 2. Calculation chart of active earth pressure for counterweight retaining wall
图 2. 衡重式挡土墙主动土压力计算图

3.2. 主动土压力系数

当墙后填土表面水平时, 采用朗肯主动土压力系数 $K_a = \tan^2(45^\circ - \phi/2)$ 进行计算。

3.3. 主动土压力分布及大小

对于无粘性土, 不受减压平台影响的朗肯主动土压力强度为:

$$p_a = qK_a + \gamma zK_a \quad (13)$$

$z = h_1$, $p_a = qK_a + \gamma h_1 K_a$; $z = H_d$, $p_a = qK_a + \gamma H_d K_a$, 即为墙底主动土压力强度; $z = h_1 + h_2 + h_3$, $p_a = qK_a + \gamma(h_1 + h_2 + h_3)K_a$, 分布图见图 2 (包括图中空白的面积在内的梯形面积)。

设置衡重台后, 可以有效减少土压力, 如果按照图 2 所示那样, 在 h_1 底端, $p_a = 0$; h_2 底端, $p_a = \gamma h_2 K_a$; h_3 底端, $p_a = \gamma h_2 K_a + \gamma h_3 K_a$ 。事实上, 式(A.0.8-2)第三项梯形面积的上底宽为 $(\gamma h_2 K_a + \gamma h_3 K_a)$, 证明了上述结论。图 2 中, h_3 底端水平线与斜线相交, 表明主动土压力强度与不受减压平台影响的主动土压力强度相等, 而设置衡重台计算的 $p_a = \gamma h_2 K_a + \gamma h_3 K_a \neq$ 不受减压平台影响计算的 $p_a = qK_a + \gamma(h_1 + h_2 + h_3)K_a$, 两者在此不能相交, 出现严重矛盾。问题到底出在哪里? 如何解决这个矛盾? 要解决这个问题从两方面考虑: 一是 h_3 底端水平线与斜线不相交, 交点处的土压力强度不相等; 二是 h_3 底端水平线与斜线相交, 交点处的土压力强度只能相等。根据土压力传递原理, 笔者建议采用第二种情况较为合理。

3.3.1. 第一种情况

h_3 底端水平线与斜线不相交, 交点处的土压力强度不相等, 设置衡重台计算的 $p_a = \gamma h_2 K_a + \gamma h_3 K_a$, 不受减压平台影响计算的 $p_a = q K_a + \gamma (h_1 + h_2 + h_3) K_a$, 需要重新绘制主动土压力强度分布图, 计算土压力大小。

3.3.2. 第二种情况

h_3 底端水平线与斜线相交, 交点处的土压力强度只能有一个, 即不受减压平台影响计算值 $p_a = q K_a + \gamma (h_1 + h_2 + h_3) K_a$, 主动土压力强度分布图不变, 但衡重式挡土墙衡重台下的主动土压力计算公式(A.0.8-2)有误, 正确表达式为[3]:

$$E_{a2} = \left[\frac{1}{2} \gamma h_2^2 + \frac{1}{2} (q + \gamma h_1 + 2\gamma h_2 + \gamma h_3) h_3 + \frac{1}{2} (2q + \gamma (h_1 + h_2 + h_3) + \gamma H_d) (H_d - h_1 - h_2 - h_3) \right] K_a \quad (14)$$

主动土压力合力的作用点位置, 可根据各分力对墙底求矩, 等于合力对墙底求矩的面积矩法求得, 这里不再赘述。

4. 挡土墙墙后有较陡峻的稳定岩石坡面时的土压力

当挡土墙墙后有较陡峻的稳定岩石坡面, 即岩坡角 $\theta > \left(45^\circ + \frac{\phi}{2} \right)$ 时, 应按有限范围填土计算主动土压力(图3)。

4.1. 有限范围填土的判别条件

符合朗肯土压力条件的破裂角 θ_{cr} 为 $\left(45^\circ + \frac{\phi}{2} \right)$, 规范给定的判别条件是成立的; 如果符合库仑土压力

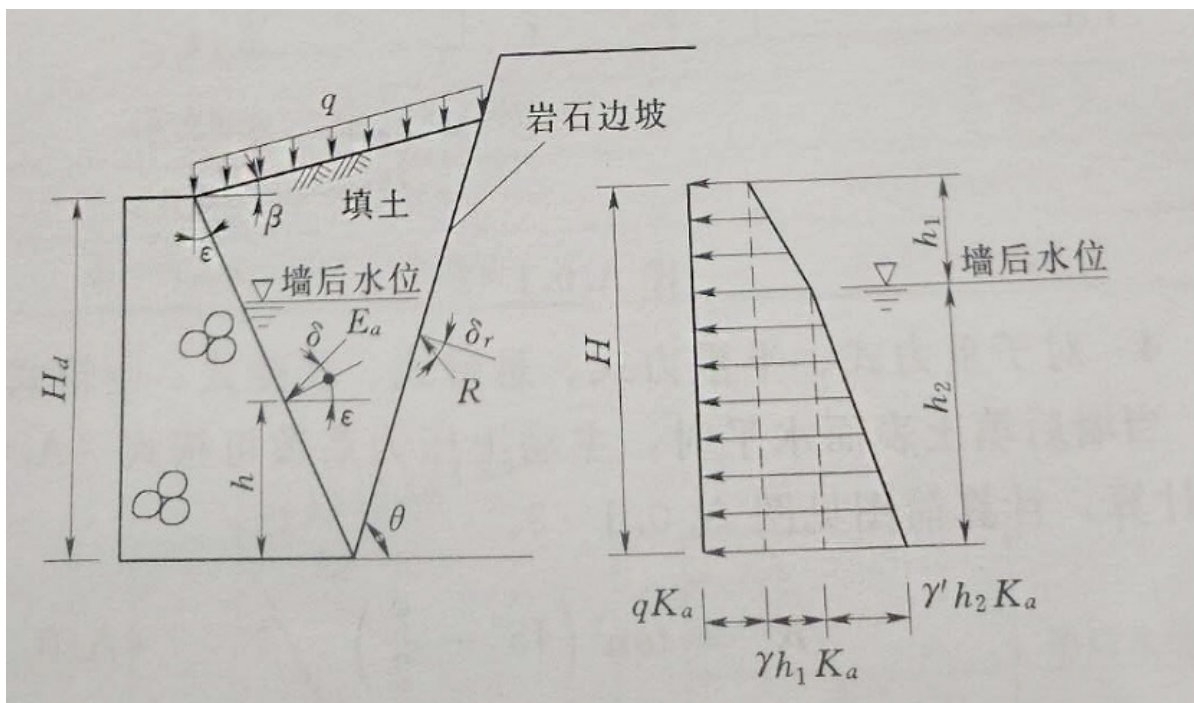


Figure 3. Calculation chart of earth pressure when there is a steep and stable rock face behind the wall

图3. 墙后有较陡峻的稳定岩石坡面时的土压力计算图

条件, 其土体的破裂角不等于 $\left(45^\circ + \frac{\phi}{2}\right)$, 因此必须确定库仑条件下土体的破裂角大小。破裂角 θ_{cr} 由下式计算[4] [5]:

$$\tan \theta_{cr} = \frac{\sin \beta \cdot s_q + \cos(\varepsilon + \phi + \delta)}{\cos \beta \cdot s_q - \sin(\varepsilon + \phi + \delta)} \quad (15)$$

$$s_q = \sqrt{\frac{\cos(\varepsilon + \delta) \sin(\phi + \delta)}{\cos(\varepsilon - \beta) \sin(\phi - \beta)}} \quad (16)$$

4.2. 主动土压力系数

当 $\theta > \theta_{cr}$ 时

$$K_a = \frac{\cos(\varepsilon - \beta) \cos(\theta - \varepsilon) \sin(\theta - \delta_r)}{\cos^2 \varepsilon \cos(\theta - \varepsilon - \delta - \delta_r) \sin(\theta - \beta)} \quad (17)$$

当 $\theta < \theta_{cr}$ 时

$$K_a = \frac{\cos^2(\phi - \varepsilon)}{\cos^2 \varepsilon \cos(\varepsilon + \delta) \left[1 + \sqrt{\frac{\sin(\phi + \delta) \sin(\phi - \beta)}{\cos(\delta + \varepsilon) \cos(\varepsilon - \beta)}} \right]^2} \quad (18)$$

式中: ε ——墙背与垂直面的夹角; β ——填土面倾角; δ ——墙背与填土的外摩擦角; ϕ ——填土的内摩擦角; θ ——开挖面倾角; δ_r ——滑动面上的摩擦角, 根据滑动面粗糙程度确定。

4.3. 主动土压力

主动土压力计算公式如下:

$$E_a = qHK_a + \frac{1}{2} \gamma h_1^2 K_a + \gamma h_1 h_2 K_a + \frac{1}{2} \gamma' h_2^2 K_a \quad (19)$$

作用方向与水平面呈 $(\delta + \varepsilon)$ 夹角。

5. 结论

1) 规范附录中式(附 A.0.6-1)~(附 A.0.6-3)中的主动土压力系数采用了同一表达符号, 显然不妥, 应根据实际情况采用不同的主动土压力系数。

2) 墙后为水平面与无限斜坡面组合、填土为有限斜坡面、填土为水平面与有限斜坡面组合等情况下的土压力分别按式(7) (9) (12)计算。

3) 衡重台下的主动土压力计算公式(附 A.0.8-2)有误, 计算公式与计算简图(附 A.0.8)相互矛盾, 正确计算公式按(14)计算。

4) 朗肯土压力的破裂角 θ_{cr} 为 $\left(45^\circ + \frac{\phi}{2}\right)$; 库仑土压力的破裂角 θ_{cr} 按(15)~(16)计算。

参考文献

- [1] 中华人民共和国水利行业标准. 水工挡土墙设计规范(SL379-2007) [S]. 北京.
- [2] 刘福臣, 等. 工程地质与土力学[M]. 第三版. 郑州: 黄河水利出版社, 2020.

- [3] 刘福臣, 林世乐. 带减压平台挡土结构的土压力计算[J]. 港工技术, 2008(4): 41-42.
- [4] 杨学强, 等. 对挡土墙上主动土压力的再研究[J]. 力学与实践, 1999(3): 37-41.
- [5] 刘福臣, 等. 有限范围填土土压力计算模式[J]. 工程勘察, 2007(8):8-10..