

重力式挡土墙设计经验谈

李 钧 民

(镇江市规划设计研究院, 镇江 212001)

【摘要】 对库仑、朗肯土压力理论和《建筑地基基础设计规范 GB7-89》附录 10—“挡土墙主动土压力系数 K_a ”提出一些看法,提出了粘性土主动土压力计算方法的改进;还提出了以抗滑移稳定为条件决定挡土墙截面的新方法和抗倾覆稳定验算的公式,并阐明墙身强度和地基应力的验算,举例说明一般重力式挡土墙的计算。

【关键词】 主动土压力 被动土压力 抗滑移稳定性 抗倾覆稳定性

【Abstract】 Some ideas about the active earth pressure coefficient K_a of retaining Wall for Coulomb's theory, Rankine's theory and the appendix of "Building Code of Foundation Design GB7-89" are proposed. The calculating method of active earth pressure is improved. The method to determine the retaining wall section by the condition of anti-slide stability and an experimental formula of anti-overturn stability are given. The calculations of wall strength and foundation stress are expounded, and an example of calculation is given.

【Key words】 active earth pressure passive earth pressure anti-slide stability anti-overturn stability

0 引言

在土建工程中,经常用挡土墙来支挡上下高差的土体,而重力式挡土墙是用得较多的一种形式。一般来讲,此种挡土墙的设计偏于保守的不少;但也有因考虑不周而致挡墙倒塌,甚至连地基发生整体滑动或因发生滑坡而被推倒。

一般重力式挡土墙的设计,须考虑以下五个问题:

- (1)抗滑移稳定性;
- (2)抗倾覆稳定性;
- (3)墙身的强度;
- (4)地基的应力;
- (5)地基的整体稳定性。

关于墙身的强度,一般毋需验算,如有必要,仅验算最危险截面,即墙身和基础结合处的强度就可以了。如地基为抗剪强度较低的软土或基底下有软弱夹层时,除验算基底和下卧层的应力外,还需作地基稳定性验算。如

因切割坡脚而砌筑挡墙,应加强工程地质勘察工作,特别注意山坡下是否存在容易发生滑坡的地质构造?经验算,切割坡脚后,有发生滑坡的可能,则此墙应作抗滑挡土墙考虑。

1 关于土压力问题

1.1 对库仑、朗肯土压理论的看法

法国学者(Coulomb)库仑在 1773 年提出的和英国的(Rankine)朗肯在 1857 年提出的两种土压力理论,直到现在,工程界还在普遍应用。这是因为这两种理论仍有其实用价值。第一,其计算模型比较简单,计算过程也不复杂;其二,用来计算主动土压力,误差不太大,而尤以库仑理论更小些。众所周知,无论库仑或朗肯理论都假定土为理想散体,只有摩擦力产生,而无粘聚力存在,故只适用于砂性土。关于散体的极限平衡理论,前苏联学者索科洛夫斯基曾作过精确的分析,用来检验和评价库仑理论的可靠性。当墙背垂直($\alpha = 0^\circ$),填土水平($\beta = 0^\circ$),不考虑土与墙背的

摩擦力($\delta=0^\circ$),由库仑理论求得的主动、被动土压力系数公式为: $K_a=\tan^2(45^\circ-\varphi/2)$ 、 $K_p=\tan^2(45^\circ+\varphi/2)$,与索氏理论完全符合,说明在这种情况下,库仑理论是可靠无误的。上述两个公式亦即砂性土朗肯理论土压力系数计算公式。当 $\alpha=0^\circ$, $\beta=0^\circ$ 和 $\delta\neq 0^\circ$ 时,由索氏的计算得出下列结论:库仑主动土压力误差一般不超过5%,而库仑被动土压力的误差是随着 φ ,特别是 δ 的增加而变大的,误差可超过50%,甚至更大。但索氏理论实质上还是不能完全反映复杂的实际情况,也只是一般近似方法,更何况对于复杂的填土和荷载情况,计算工作十分繁重,其实用价值不大。库仑土压力的误差主要是由于假设的滑动面为一平面而引起的。一般讲,库仑主动土压力计算实用上是足够准确的,而被动土压力与实际情况出入之大,有时不能应用于具体的工程设计中。朗肯土压力理论由于不考虑土与墙背的摩擦力,以致主动土压力偏大,而被动土压力则偏小。一般来讲,用朗肯土压力理论计算主动土压力作挡土墙的计算是比较保守的,除非墙背垂直而光滑,不能考虑墙背摩擦力。当朗肯发表其土压力理论时,与库仑理论一样,仅限于无粘聚力的砂性土,后来培尔氏于1915年始将朗肯理论扩大使之适用于粘性土。(Terzaghi)太沙基认为库仑和朗肯土压力理论只适用于无挠曲的重力式挡土墙之类的挡土构筑物。

1.2 对《建筑地基基础设计规范 GBJ7-89》附录11“挡土墙主动土压力系数 K_a ”的看法
在计算 K_a 的公式中,几乎所有计算主

动压力的各种条件和参数如挡墙背面的角度 α (注意此 α 与库仑公式中的 α 含义不一样),墙后土坡的倾角 β 、墙摩擦角 δ 、粘性土的抗剪强度指标 c 、 φ 、地表均布荷载 q 以及挡墙的高度 h ,都已包括在内。但是粘性土的主动土压力计算毕竟是复杂的,要想用一个数学模式来全面正确地概括,这是不可能的。只有用简单的、误差又不大的计算方法,才具有真正的实际意义。笔者曾用朗肯、库仑及规范诸法计算 $H=8\text{m}$, $\beta=0^\circ$ 的直立式挡土墙(图1)的主动土压力(当粘性土的 $c=10\text{kPa}$ 、 $\varphi=25^\circ$ 、 $\gamma=18.6\text{kN/m}^3$, $q=0$, $\delta=10^\circ$,用朗肯理论计算时 $\delta=0^\circ$)列入表1中。从计算结果来看,如以规范法 $\delta=10^\circ$ 为准,库仑理论以 φ_{D1} 代 φ 计算主动土压力与规范法算得的结果之比仅1.10;以规范法 $\delta=0^\circ$ 为准,朗肯理论以 φ_{D1} 代 φ 计算主动土压力与规范法算得的结果之比为1.08。可见,用规范法算与库仑、朗肯理论算得的结果相差不大,但其算式冗繁,易得错误结果,笔者认为其实用意义不大。

表1 主动土压力计算表

计算方法		主动土压力 $E_a/(kN \cdot m^{-1})$	E_a 的水平分力 $E_{ax}/(kN \cdot m^{-1})$
朗肯理论 (以 φ_{D1} 代 φ) $\delta=0^\circ$	φ_{D1}	150.4	150.4
	φ_{D2}	118.7	118.7
库仑理论 (以 φ_{D1} 代 φ) $\delta=10^\circ$	φ_{D1}	140.5	138.4
	φ_{D2}	111.9	110.2
规范法	$\delta=10^\circ$	127.8	125.9
	$\delta=0^\circ$	139.6	139.6

注:表中 φ_{D1} 、 φ_{D2} 为粘性土的第一、第二等代内摩擦角,其含义、计算方法和使用条件详见[2]。

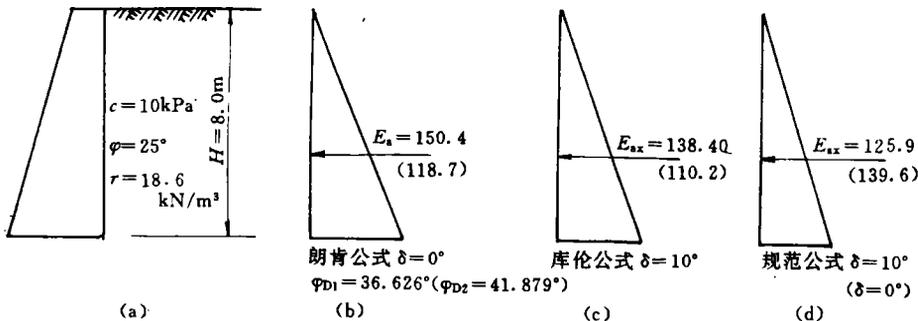


图1 直立式挡土墙主动土压力计算图

1.3 粘性土主动土压力计算方法的改进

在实际工程中,经常碰到粘性土。笔者认为:在计算挡墙上的主动土压力时,既要考虑粘聚力的作用,又要计及墙面摩擦力的客观存在;因此,可采用将朗肯、库仑两种理论相融合的方法来处理,即以朗肯的理论求等代内摩擦角 φ_0 ,然后将 φ_0 取代 φ 代入库仑土压力理论的公式中以计算主动土压力。关于 φ_0 的求法详见参考文献^{[2][3]}。

今以一般直立式挡墙($\alpha=0^\circ$)为例,墙后土面水平($\beta=0^\circ$),先求出 φ_0 (φ_{01} 和 φ_{02}),如挡墙高度 H 范围内为多层粘性土,应先求其 c 、 φ 、 γ 的加权平均值,然后再求 φ_0 ,代入朗肯公式求得主动土压力系数 $K_{ar} = \tan^2(45^\circ - \varphi_0/2)$,为了考虑土与墙背的摩擦作用,可将 K_{ar} 乘一调整系数 ξ , ξ 值随 φ_0 及 δ 而变化,很明

显, ξ 以下式求得:

$$\xi = \frac{K_{ac} \cdot \cos \delta}{K_{ar}} \quad (1)$$

式中: K_{ac} ——表示按库仑公式计算的主动土压力系数,当 $\alpha=0^\circ$ 、 $\beta=0^\circ$ 时:

$$K_{ac} = \frac{\cos^2 \varphi_0}{\left[\sqrt{\cos \delta} + \sqrt{\sin(\varphi_0 + \delta) \sin \varphi_0} \right]^2} \quad (2)$$

事实上,采用 ξK_{ar} 求得的主动土压力实为按 K_{ac} 求得的水平分力 E_{ax} ,而 E_a 垂直分力:

$$E_{ay} = E_{ax} \tan \delta \quad (3)$$

式中: ξ 、 ξK_{ar} ——可按表 2 查用;

δ ——墙摩擦角 δ ,一般按 $(1/3 \sim 1/2)\varphi_0$ 计。

表 2 k_{ar} 、 ξk_{ar} 值表

φ_0 (φ_{01} 、 φ_{02})		20°	25°	30°	35°	40°	45°	50°
$K_{ac}(\delta=0^\circ)$		0.49029	0.40586	0.33333	0.27099	0.21744	0.17157	0.13247
$\delta = \frac{\varphi_0}{3}$	ξ	0.92799	0.91840	0.91134	0.90656	0.90388	0.90323	0.90456
	ξK_{ar}	0.45498	0.37274	0.30378	0.24567	0.19654	0.15497	0.11983
$\delta = \frac{\varphi_0}{2}$	ξ	0.89734	0.88370	0.87344	0.86620	0.86174	0.85993	0.86073
	ξK_{ar}	0.43996	0.35866	0.29114	0.23473	0.18738	0.14754	0.11402

2 抗滑移稳定决定挡土墙截面的方法

关于重力式挡土墙的设计,一般先根据墙后填土性质、工程地质情况和砌筑材料等条件,凭经验初步拟定挡土墙截面的尺寸,首先应作抗滑移稳定验算,如不能满足要求,则改变截面尺寸或采取其它措施,待满足抗滑移要求后,然后再作其它各种验算。本文所提决定挡土墙截面的方法,并非先作假定,而是以抗滑移稳定为条件,经计算决定。

一般重力式挡土墙,为了增大其抗滑稳定性,并尽可能减小砌体的截面积,可将基底作成与土压力方向相反的斜坡,但其倾斜度不宜过大,以免基底和墙趾前的土体发生剪切破坏。通常,如为土质地基,可视其软硬程度,选用基底倾斜度 $i=0.1 \sim 0.2$;岩石地基

时 $i \leq 0.3$ 。地基较弱时,对基底的摩擦系数 μ 较小(见表 3),可于基底夯垫一层 150mm 厚, μ 值较大的如砾砂或级配碎石、砂, μ 值即可按新垫的材料计算。

表 3 土对挡土墙基底的摩擦系数表

土的类别	摩擦系数 μ
粘性土(可塑 $0.25 < I_L < 0.75$)	0.25~0.30
粘性土(硬塑 $0 < I_L \leq 0.25$)	0.30~0.35
粘性土(坚硬 $I_L \leq 0$)	0.35~0.45
粉土($s_r \leq 0.5$)	0.30~0.40
中砂、粗砂、砾砂	0.40~0.50
碎石土	0.40~0.60
软质岩石	0.40~0.60
表面粗糙的硬质岩石	0.65~0.75

2.1 直立式挡土墙

如图 2 所示的直立式挡土墙,主动土压

力的水平分力:

$$E_{ax} = \frac{1}{2} \gamma H (H + 2h_0) \xi K_{ax} \quad (4)$$

式中: h_0 ——地表均布荷载当量填土高

$$h_0 = \frac{q}{\gamma};$$

ξK_{ax} ——根据已知的 φ, δ 值查表 2 求得。

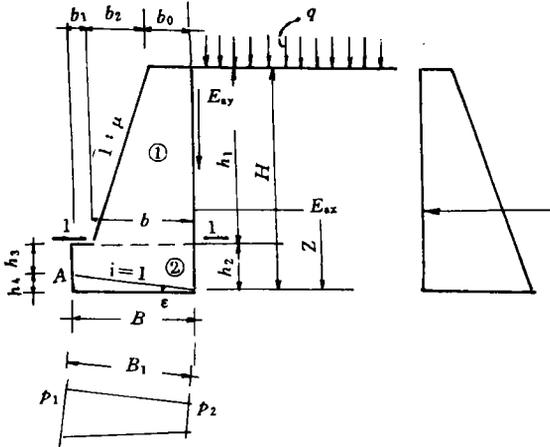


图 2 直立式挡土墙抗滑移截面计算图

挡墙总重:

$$W = 0.5[(b_0 + b)h_1 + ch_2 + h_3]B\gamma_m \quad (5)$$

式中: γ_m ——挡土墙圬工的容重, kN/m^3 ;

土压力和挡墙总重的合力 R 与铅直线间的交角:

$$\theta = \tan^{-1} \frac{E_{ax}}{W + E_{ay}} \quad (6)$$

$$\text{而 } R = \sqrt{(W + E_{ay})^2 + E_{ax}^2} \quad (7)$$

式中: E_{ay} ——主动土压力 E_a 的垂直分力, 用 (3) 式计算。当基底的倾角为 ϵ , 则 R 沿基底斜面的法向分力和切向分力为:

$$R_N = R \cos(\theta - \epsilon) \quad (8)$$

$$R_t = R \sin(\theta - \epsilon) \quad (9)$$

因此, 抗滑移安全系数为:

$$K_s = \frac{\mu R \cos(\theta - \epsilon)}{R \sin(\theta - \epsilon)} = \mu \cot(\theta - \epsilon) \geq 1.3 \quad (10)$$

为了使 $K_s \geq 1.3$, θ 角应按下式控制:

$$\theta \leq \tan^{-1} \frac{\mu + 1.3i}{1.3 - \mu i} \quad (11)$$

亦即挡土墙总重应符合下式的要求:

$$W \geq \cot \theta \cdot E_{ax} - E_{ay} = \lambda E_{ax} - E_{ay} \quad (12)$$

$$\text{式中: } \lambda = \cot \theta = \frac{1.3 - \mu i}{\mu + 1.3i} \quad (13)$$

当已知基底的坡度 $i = 0 \sim 0.3$, $\mu = 0.25 \sim 0.50$ 时, 可求得 λ 值见表 4。

表 4 λ 值表

μ	0.25	0.30	0.35	0.40	0.45	0.50
$i=0$	5.200	4.333	3.714	3.250	2.889	2.600
$i=0.10$	3.355	2.953	2.635	2.377	2.164	1.984
$i=0.15$	2.837	2.535	2.289	2.084	1.911	1.763
$i=0.20$	2.451	2.214	2.016	1.848	1.704	1.579
$i=0.25$	2.152	1.960	1.796	1.655	1.532	1.424
$i=0.30$	1.914	1.754	1.615	1.494	1.387	1.292

图 2 中, 挡土墙顶宽 b_0 为已知 (当采用浆砌块石, b_0 不小于 0.5m, 混凝土挡墙 b_0 最小可为 0.2~0.4m), 控制台阶高宽比 $h_3/b_1 \geq 2$, $h_2 = 0.8 \sim 1.0$ (视基础的埋置深度而定, 埋深一般不小于 1.0m, 墙趾覆土厚度不小于 0.2m), $h_1 = H - h_2$, 外墙面倾斜度为 $1:n$, 基底的倾斜度 $i=1$, 因此 b, h_3, B 的尺寸都可化为 n 的函数, 故挡土墙总重 W 实为 n 的二次函数, 代入 (10) 式, 即可求解 n 的最小限值。实际采用 n 稍大于此值, 则抗滑移安全系数 K_s 必大于 1.3。

2.2 仰斜式挡土墙

仰斜式挡土墙 (见图 3a), 墙背坡度愈缓, 主动土压力愈小, 但为了避免施工困难, 仰斜墙背坡度一般不宜缓于 $1:0.25$, 墙面坡应尽量与墙背坡平行。关于土与墙背摩擦角 δ , 当墙背坡不缓于 $1:0.25$ 时, 可假设与墙背的仰斜角 α 相等, 因此按库仑公式计算的主动土压力呈水平方向, 这样可使计算简化。

当墙背仰斜时 α 值为负, 故 $\alpha + \delta = 0^\circ$, 代入库仑理论的主动土压力系数公式, 得:

$$K_a = \frac{\cos^2(\varphi - \alpha)}{\cos^2 \alpha \left[1 + \sqrt{\frac{\sin(\varphi + \delta) \sin(\varphi - \beta)}{\cos(\alpha - \beta)}} \right]^2} \quad (14)$$

$$\text{主动土压力: } E_a = \frac{1}{2} K_a \gamma H (H + 2K_q h_0) \quad (15)$$

$$\text{式中: } K_q = \frac{\cos \alpha \cos \beta}{\cos(\alpha - \beta)} \quad (16)$$

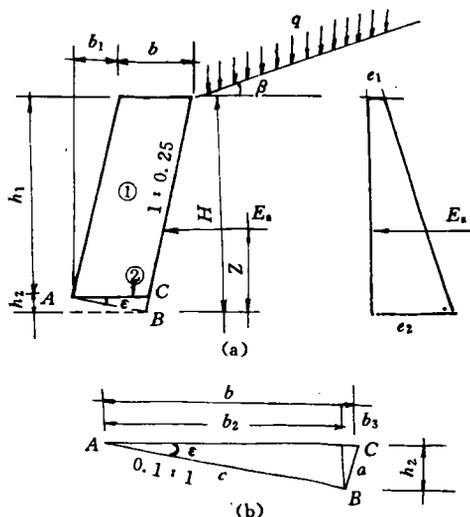


图3 仰斜式挡土墙

如墙后土面呈水平状态,则 $\beta=0^\circ$, $K_q=1$ 。上述用于直立式挡土墙的计算公式(6)~(13)仍可照用,但 E_{ax} 以 E_a 代, $E_{ay}=0$, 代入(12)式,可得:

$$W \geq \lambda E_a$$

亦即每延米挡土墙的圬工体积:

$$V \geq \lambda E_a / \gamma_m$$

先设挡墙基底的倾斜度 $i=0.1$, 墙背的倾斜度为 $1:0.25$, 为了准确地求得挡墙的截面积, 必须先求出 h_2 。图3b为挡墙底 $\triangle ABC$ 部分的放大图, 在此三角形中: $\angle A = \epsilon = \tan^{-1}0.1$, $\angle C = 90^\circ - \tan^{-1}0.25$, $\overline{AC} = b$, 先求解此三角形的 a, c 两边。

$$\frac{1}{2}(\angle C + \angle A)$$

$$= \frac{1}{2}(90^\circ - \tan^{-1}0.25 + \tan^{-1}0.1) = 40.837^\circ$$

$$\frac{1}{2}(\angle C - \angle A)$$

$$= \frac{1}{2}(90^\circ - \tan^{-1}0.25 - \tan^{-1}0.1) = 35.126^\circ$$

$$c + a = \frac{\cos \frac{1}{2}(\angle C - \angle A)}{\cos \frac{1}{2}(\angle C + \angle A)} b = \frac{\cos 35.126^\circ}{\cos 40.837^\circ} b$$

$$= 1.081039222b = S$$

$$c - a = \frac{\sin \frac{1}{2}(\angle C - \angle A)}{\sin \frac{1}{2}(\angle C + \angle A)} b = \frac{\sin 35.126^\circ}{\sin 40.837^\circ} b$$

$$= 0.0879912118b = D$$

$$c = \frac{1}{2}(S + D) = \frac{1}{2}(1.081039222 +$$

$$0.0879912118)b = 0.98047567b$$

$$a = \frac{1}{2}(S - D) = \frac{1}{2}(1.081039222 -$$

$$0.0879912118)b = 0.100563552b$$

$$h_2 = c \cdot \sin(\tan^{-1}0.1) = 0.980475b \cdot \sin(\tan^{-1}0.1)$$

$$= 0.097560975b$$

$$b_2 = c \cdot \cos(\tan^{-1}0.1) = 0.980475b \cdot \cos(\tan^{-1}0.1)$$

$$= 0.975609755b$$

$$b_3 = (1 - 0.975609755)b = 0.024390245b$$

很明显, 挡墙的截面积为:

$$F = Hb - 0.5bh_2 = Hb - 0.5 \times 0.09756b^2 \\ = Hb - 0.04878b^2$$

其实 $V = F$, 故可建立以下方程式:

$$0.04878b^2 - Hb + \frac{\lambda E_a}{\gamma_m} \leq 0$$

解此方程, 即可求得 b 的最小限值。只要取略大于此值为挡墙的宽度, K 就必定大于 1.3。如 $i=0.15, 0.20$, 可用上述同样的方法求解 c, a, h_2, b_2, b_3 诸值, 并列求解 b 的普遍方程式:

$$Kb^2 - Hb + \frac{\lambda E_a}{\gamma_m} \leq 0 \quad (17)$$

当 $i=0.10, 0.15, 0.20, b_2, b_3, h_2, K$ 值列入表5中, 以备查用。

表5 b_2, b_3, h_2, K 表

i	b_2	b_3	h_2	K
0.10	0.97561b	0.02439b	0.09756b	0.04878
0.15	0.96386b	0.03614b	0.14458b	0.07229
0.20	0.95238b	0.04762b	0.19048b	0.09524

3 抗倾覆稳定性验算的公式

当挡土墙截面的所有尺寸已经定出。可直接代入下列公式作抗倾覆稳定性验算。

3.1 直立式挡土墙

图1中: $b = b_0 + nh_1$,

$$B = b_1 + b_0 + nh_1, h_4 = iB$$

$$h_3 = b_2 - iB。$$

将挡土墙截面划分成①、②两个梯形, 其面积及重心离前趾 A 点的距离各为:

$$F_1 = 0.5(b_0 + b)h_1 \quad (18)$$

$$a_1 = B - \frac{b_0^2 + b_0b + b^2}{3(b_0 + b)} \quad (19)$$

$$F_2 = 0.5(h_2 + h_3)B \quad (20)$$

$$a_2 = B - \frac{B(h_2 + 2h_3)}{3(h_2 + h_3)} \quad (21)$$

总的抵抗力矩(对 A 点取矩)为:

$$M_r = \gamma_m \Sigma F a + E_{ay} B \quad (22)$$

主动土压力 E_a 作用点离挡墙后踵的距离:

$$z = \frac{H(H + 3h_0)}{3(H + 2h_0)} \quad (23)$$

E_a 的水平分力 E_{ax} 对挡墙前趾 A 点的倾覆力矩:

$$M_0 = E_{ax}(z - h_4) \quad (24)$$

抗倾覆安全系数:

$$K_0 = \frac{M_r}{M_0} = \frac{\gamma_m \Sigma F a + E_{ay} B}{E_{ax}(z - h_4)} \geq 1.5 \quad (25)$$

3.2 仰斜式挡土墙

如图 3a 所示,将挡土墙截面划分成①、②两部分,其面积及重心离前趾 A 点的距离各为:

$$F_1 = bh_1 \quad (26)$$

$$a_1 = 0.5(b_1 + b) \quad (27)$$

式中: $b_1 = 0.25h_1 = 0.25(H - h_2)$

$$F_2 = 0.5bh_2 \quad (28)$$

$$a_2 = \frac{\frac{1}{3}h_2b^2 + \frac{1}{2}b_3h_2(b_2 + \frac{b_3}{3})}{F_2} \quad (29)$$

总的抵抗力矩(对 A 点取矩)为:

$$M_r = \gamma_m \Sigma F a \quad (30)$$

挡墙顶和后踵的土压力强度各为:

$$e_1 = \gamma h_0 K_q K_a \quad (31)$$

$$e_2 = \gamma(H + h_0 K_q) K_a \quad (32)$$

$$z = \frac{H}{3} \cdot \frac{2e_1 + e_2}{e_1 + e_2} \quad (33)$$

E_a 对前趾 A 点的倾覆力矩为:

$$M_0 = E_a(z - h_2) \quad (34)$$

抗倾覆安全系数:

$$K_0 = \frac{M_r}{M_0} = \frac{\gamma_m \Sigma F a}{E_a(z - h_2)} \geq 1.5 \quad (35)$$

4 墙身强度计算

4.1 法向承载力验算

重力式挡土墙墙身某截面法向承载力按无筋砌体偏心受压构件计算。按《砌体结构设计规范 GBJ3-88》第 4.1.5 条:轴向力的偏心距 e 按荷载标准值计算并不宜超过 $0.7y$, y 为截面重心到轴向力所去偏心方向截面边缘的距离。当 $e \leq 0.7y$ 时,按《GBJ3-88》第 4.1.1 条,承载力按下式计算:

$$N \leq \varphi f A \quad (36)$$

式中: φ ——高厚比;

β ——和轴向力的偏心距;

e ——对受压构件承载力的影响系数,可根据高厚比 β 与矩形截面轴向力偏心方向的边长之比 e/h ,查《GBJ3-88》附录 5 附表 5-1 至 5-5,或按附录 5 的公式计算。关于高厚比 β ,粗料石和毛石砌体应乘以系数 1.5。一般验算墙身和基础结合外截面的强度。计算高厚比时,厚度可取该截面至墙顶之间的平均值。计算高度 H_0 按上端为自由端考虑,即验算截面以上高度应乘以 2。

4.2 剪切应力验算

计算截面上的剪应力应小于砌体的抗剪强度设计值。亦即:

$$\frac{E_{ax1-1} - (W_{1-1} + E_{ay1-1})\mu}{b} \leq f_v \quad (37)$$

式中: W_{1-1} ——验算截面 1-1 以上挡墙的自重;

E_{ax1-1} 、 E_{ay1-1} ——验算截面 1-1 以上的主动土压力的水平分力和垂直分力;

μ ——圬工与圬工间的摩擦系数,一般用 0.4~0.5;

b ——取挡墙的单位长度为 1m;

f_v ——砌体的抗剪强度设计值,查《GBJ3-88》表 2.2.2-1。

按上式计算的剪应力很小,有时甚至为负值,故一般可不予验算。(未完待续)