

格仓式挡墙在治理滑坡中的应用

李钧民

(镇江市规划设计研究院, 镇江 212001)

【摘要】 用于治理滑坡的重力式挡墙, 由于其圬工量太大, 材料确有浪费。将滑坡体上削方卸载下来的土填入连续型多格仓内的挡墙不但能增加其自重, 以平衡它的水平滑移和倾覆; 而且其强度也不致减弱太多, 能达到治理滑坡的目的。

【关键词】 滑坡治理; 滑坡推力; 格仓式挡墙

【Abstract】 Gravity retaining wall used for landslide control is wastful in materials exactly, for its quantity of masonry is too much. The cellular retaining wall with the continuous multiple cells filled by the larth cut from the landslide slope for reducing its weight not only increases the weight of the wall itself to equilibrate its horizontal slide and overturn, but also does not reduce its strength too much to attain the goal of landslide control

【Key words】 landslide control; landslide thrust; cellular retaining wall

0 引言

重力式挡墙是治理一般浅层滑坡经常采用的一种结构型式, 其最明显的优点是施工比较简单, 因毋需特殊的施工机械。如稳定土层或岩层较浅, 挡墙基础能深入其中(一般在稳定土层下 ≥ 2 m, 完整的岩层面以下 ≥ 0.5 m), 滑坡推力计算结果可靠, 采用重力式挡墙来治理确能收到良好的效果。其缺点为所需圬工量太大, 如不加以改进, 有时往往是不经济的。

笔者提出一种新颖的格仓式挡墙, 利用削坡减载下来的土方填入挡墙的格仓内, 以减少圬工量并增加其自重, 使抗滑移和抗倾覆稳定满足要求, 同时通过合理计算, 其强度也不致减弱太多而能达到治理滑坡的目的。

1 抗滑挡墙所需总重量的简单分析

图1中作用于每延米挡墙上的滑坡推力;

$$F = W_s(\sin \beta - \cos \beta \tan \varphi_r) \quad (1)$$

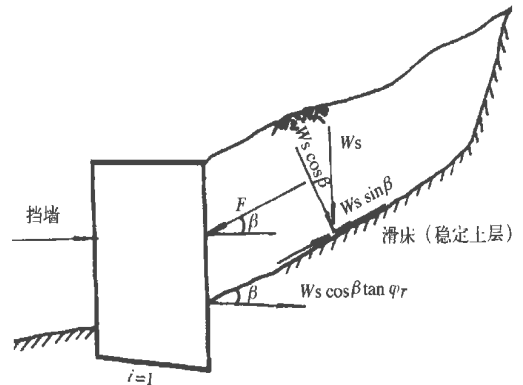


图1 浅层滑坡示意图

式中: W_s ——沿挡墙每延米滑坡土体的重量, kN/m ;

在治理滑坡时, 由于考虑到滑坡可能发生不止一次, 为安全起见, 应采用土的残余抗剪强度($s_r = c_r + \sigma \tan \varphi_r$)来作滑坡推力的

计算,而残余粘聚力 c_r 值又很小,可取 $c_r \approx 0$,故 $\tan \varphi_r$ 实为滑坡土体与滑床之间的摩擦系数^[1]。滑坡推力 F 的作用点可取在滑体厚度的二分之一处,其方向平行于滑动面²。

为了使挡墙满足抗滑移稳定的规定,每延米挡墙的重量 W 应符合下式的要求:

$$W \geq W_s (\sin \beta - \cos \beta \tan \varphi_r) (\lambda \cos \beta - \sin \beta) \quad (2)$$

$$\text{令 } \eta = (\sin \beta - \cos \beta \tan \varphi_r) (\lambda \cos \beta - \sin \beta) \quad (3)$$

则 $W \geq \eta W_s$

式中: λ ——量纲一的量, $\lambda = \frac{1.3 - \mu i}{\mu + 1.3}$ (μ 为挡墙基底的摩擦系数, i 为基底的倾斜度)。

关于 λ 值的由来,请查阅文献[3]。

从式(2)可以看出:所需挡墙的重量 W 随着滑坡土体重量 W_s 、滑动面坡角 β 和 λ 值的增大而增加; φ_r 值大, η 值则减小。一般 η 大概为 0.2~0.5。由此可见采用重力式挡墙治理滑坡,所需圬工量相当大。

2 格仓式抗滑挡墙的设计计算

格仓式抗滑挡墙的设计,也和一般的重力式挡土墙一样,必须考虑以下 5 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。本节主要讲述前 3 个问题,其它就毋需赘述了。

2.1 格仓式挡墙的构造

如图 2 所示,格仓式挡墙由前后纵墙和横隔墙组成,形成连续的格仓,前后纵墙的内侧可做成半圆形,这样,当滑坡推力作用在后墙上时,一开始能起到一圆拱的作用以抵抗此巨大推力,并将其传递至横隔墙和前纵墙,使挡墙截面能发挥其整体作用;同时考虑到格仓中填土的作用,前后墙、横隔墙中会出现拉力,如砌体的抗拉强度不足,则可配置适量的 U 状钢筋,两端伸入横隔墙中以承受之。所有墙体均可采用浆砌片、块石或小石子混凝土砌片、块石砌体。一般宜选用 MU30 以上的石材,砂浆强度等级不低于 M5,小石子混

凝土不低于 C20。挡墙后下部设置透水的碎石盲沟,以便滑坡体中的地下水能顺利流入,并通过墙上的泄水孔流经铺设在格仓下部的碎石层,排入墙前的排水沟中。如滑坡体中的地下水有较高的孔隙水压力,也可通过水平方向的排水管来降低^[4]。

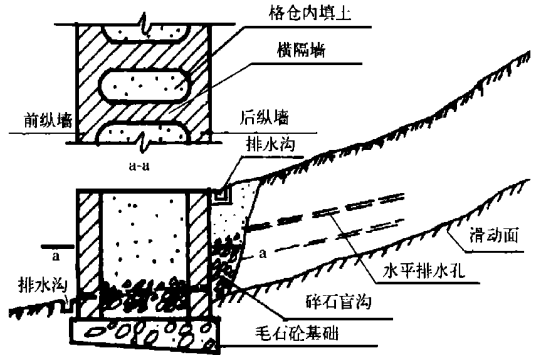


图 2 格仓式挡墙的构造

2.2 格仓式挡墙的结构计算

2.2.1 抗滑移稳定性验算

图 3(a) 所示,取相邻格仓的中心线之间的部分为计算单元,其截面的力学性质与图 3(b) 无异。每单元格仓内填土的截面积为:

$$A_{e1} = d(h_1 + 0.25\pi d) \quad (4)$$

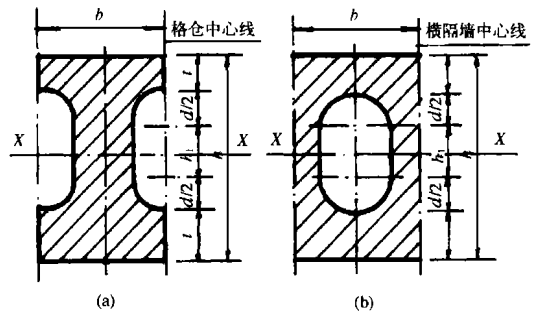


图 3 格仓式挡墙计算单元

砌体的截面积为:

$$A_m = bh - d(h_1 + 0.25\pi d) \quad (5)$$

式中: b 、 h 、 d 、 h_1 应通过抗滑移稳定验算后酌定,如何具体计算,详见本文 3.1。每单元基础上格仓外的填土面积为:

$$A_{e2} = a \cdot b \quad (6)$$

每单元总的填土面积为:

$$A_e = A_{e1} + A_{e2} = d(h_1 + 0.25\pi d) + ab \quad (7)$$

故每单元上部砌体和填土的总重量为:

$$W_u = (A_e \gamma_e + A_m \gamma_m) H_1 \quad (8)$$

式中 γ_e —— 填土的重度, kN/m^3 ;

γ_m —— 砌体的重度, kN/m^3 ;

H_1 —— 砌体的高度, m。

每单元基础的重量为:

$$W_f = 0.5bB(2h_{f1} - iB) \gamma_f \quad (9)$$

式中: B —— 基础的宽度 ($B = h + 2a$), m;

h_{f1} —— 基础靠后踵的厚度, m;

γ_f —— 基础的重度, kN/m^3 。

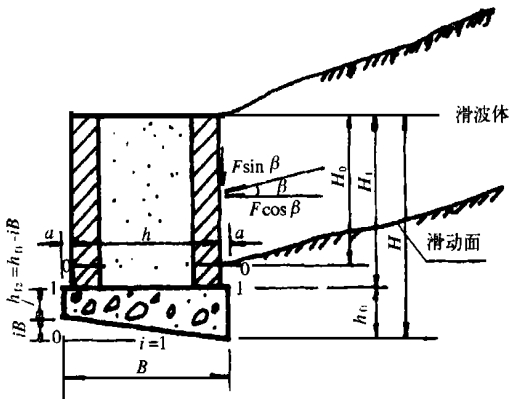


图4 格仓式挡墙计算简图

为了满足抗滑移的要求, 必须符合以下条件:

$$W_u + W_f \geq bF(\lambda \cos \beta - \sin \beta) \quad (10)$$

2.2.2 抗倾覆稳定性验算

作用在挡墙每单元宽度 b 上滑坡推力的水平分力对基底前趾 O 点的倾覆力矩:

$$M_0 = bF \cos \beta (H - 0.5H_0 - iB) \quad (11)$$

式中: H_0 —— 靠挡墙处滑坡体的厚度, m。

基础对 O 的抵抗力矩:

$$M_d = \frac{bB^2}{6}(3h_{f1} - iB) \gamma_f \quad (12)$$

格仓砌体及仓内填土对 O 的抵抗力矩:

$$M_{r2} = 0.5BH_1(A_m \gamma_m + A_{e1} \gamma_e) \quad (13)$$

基础上格仓外填土对 O 的抵抗力矩:

$$M_{r3} = A_{e2} \gamma_e H_1 (B - 0.5a) \quad (14)$$

滑坡推力的垂直分力对 O 产生的抵抗力矩:

$$M_{r4} = bF(B - a) \sin \beta \quad (15)$$

挡墙的倾覆安全系数:

$$K_0 = \frac{\sum M_r}{M_0} = \frac{M_{d1} + M_{d2} + M_{r3} + M_{r4}}{M_0} \geq 1.5 \quad (16)$$

2.2.3 墙身的强度验算

格仓式挡墙墙身强度除了验算其法向应力外, 还必须作剪切应力的验算。

2.2.3.1 法向应力计算^[5]

一般验算墙身和基础结合处截面 1-1 的法向应力。此截面上总的法向力为:

$$N_1 = A_m \gamma_m H_1 + bF \sin \beta \quad (17)$$

而所受弯矩为:

$$M_1 = 0.5bF \left[(2H_1 - H_0) \cos \beta - h \sin \beta \right] \quad (18)$$

图3中挡墙一个计算单元砌体截面积 A_m 对中心轴 $X-X$ 的截面模量:

$$W_x = \frac{1}{6h} \left[(bh^3 - dh_1^3) - \frac{d^2}{16} (3\pi d^2 + 32h_1 d + 12\pi h_1^2) \right] \quad (19)$$

故此截面上的法向应力应为:

$$\sigma_{\min}^{\max} = \frac{N_1}{A_m} \pm \frac{M_1}{W_x} \leq K[\sigma_a] \quad (20)$$

式中: K 为塑性影响系数, 按 $K = 1 + 1.5 \frac{e_0}{y}$,

$$\text{而 } e_0 = \frac{M_1}{N_1},$$

$K \leq 1.25$ (非矩形截面);

$[\sigma_a]$ 为砌体容许轴心受压应力, MPa。

当 σ_{\min} 为负值时, 表示为拉应力, 其绝对值应小于砌体的容许弯曲拉应力 $[\sigma_{w1}]$ (通缝)。

2.2.3.2 剪切应力计算

墙身的剪切应力一般验算 0—0 截面,此截面上的法向力为:

$$N_0 = A_m \gamma_m H_0 + bF \sin \beta \quad (21)$$

剪切应力按下式计算:

$$\tau_{max} = \frac{bF \cos \beta - N_0 \mu_m}{A_m} \leq [\sigma_j] \quad (22)$$

式中: μ_m ——砌体间的摩擦系数,一般取

$$\mu_m = 0.4 \sim 0.5;$$

$[\sigma_j]$ ——砌体通缝容许直接剪应力, MPa。

片、块石砌体容许轴心受压应力 $[\sigma_a]$ 、容许通缝直接剪应力 $[\sigma_j]$ 、容许齿缝拉应力 $[\sigma_l]$ 和容许通缝弯曲拉应力 $[\sigma_{wl}]$ 查表 1 和表 2。

表 1 浆砌片、块石砌体 $[\sigma_a]$

MPa

砌体种类	石材强度等级	砂浆强度等级				
		M 10	M 7.5	M5	M 2.5	M 1
片石砌体,厚度不小于 15 cm 的石料,砌筑时敲去其尖锐凸出部分,放置平稳,用小石块堵塞空隙。	MU100	2.2	1.9	1.6	1.3	0.9
	MU80	1.9	1.7	1.4	1.1	0.8
	MU60	1.7	1.5	1.2	0.9	0.7
	MU50	1.5	1.3	1.1	0.8	0.6
	MU40	1.3	1.2	1.0	0.7	0.5
	MU30	1.1	1.0	0.8	0.6	0.4
	MU25	1.0	0.9	0.7	0.6	0.4
块石砌体,厚度 20~30 cm 的石料,形状大致方正,宽度约为厚度 1~1.5 倍,每层石料高度大致一律,并错缝砌筑	MU100	5.5	5.0	4.6	4.0	3.7
	MU80	4.5	4.2	3.8	3.3	3.0
	MU60	3.6	3.3	2.9	2.6	2.3
	MU50	3.1	2.8	2.5	2.2	1.9
	MU40	2.6	2.4	2.1	1.8	1.6
	MU30	2.1	1.9	1.7	1.4	1.2
MU25	1.8	1.6	1.5	1.2	1.0	

表 2 浆砌片、块石砌体 $[\sigma_j]$ (通缝)、 $[\sigma_l]$ (齿缝)、 $[\sigma_{wl}]$ (通缝)

MPa

应 力	截 面	砌体种类	砂浆强度等级				
			M 10	M 7.5	M5	M 2.5	M 1
直接剪应力 $[\sigma_j]$	通缝	片、块石砌体	0.11	0.09	0.08	0.05	0.04
拉应力 $[\sigma_l]$	齿缝	片石砌体	0.11	0.09	0.08	0.06	0.05
		块石砌体	0.15	0.13	0.12	0.09	0.07
弯曲拉应力 $[\sigma_{wl}]$	通缝	片、块石砌体	0.16	0.14	0.11	0.08	0.06

2.2.3.3 横隔墙受拉验算

图 5 中,当格仓内先填土,墙后尚无滑坡推力作用时,半圆形仓壁上的土压力可按下列式计算:

$$p = k_a \gamma_e h_e$$

式中: k_a ——主动土压力系数;

$$k_a = \tan^2(45^\circ - \frac{\varphi}{2});$$

h_e ——仓内填土的深度, m。

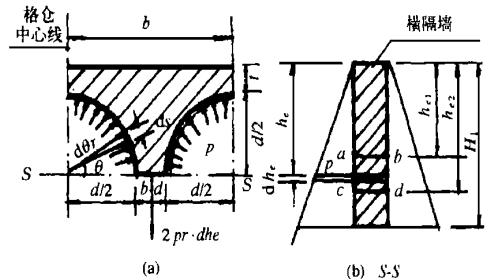


图 5 横隔墙受拉验算

如图 5(a), 取挡墙纵墙的一个单元为隔离体, 并自墙顶下 h_e 处切出一薄片 dh_e , 根据力的平衡原理, 可求得横隔墙上自其顶下 h_{e1} 到 h_{e2} 范围 (即 $abcd$ 部分) 截面上受到的拉力为:

$$T = 2 \int_{h_{e1}}^{h_{e2}} \int_0^{\pi/2} k_a \gamma_e r h_e \sin \theta d\theta dh_e = k_a \gamma_e r (h_{e2}^2 - h_{e1}^2) \quad (25)$$

故此段墙身的平均拉应力为:

$$\sigma_l = \frac{T}{(h_{e2} - h_{e1})(b - d)} = \frac{k_a \gamma_e d (h_{e2} + h_{e1})}{2(b - d)} < [\sigma_l] \quad (26)$$

通常取 $h_{e2} - h_{e1} = 0.5$ 计算

如 $\sigma_l > [\sigma_l]$, 在灰缝中酌量设置 U 型钢筋。

3 设计计算示例

已知滑坡的设计数据: $F = 430 \text{ kN/m}$, $\beta = 13^\circ$, $H_0 = 5.0 \text{ m}$, $\gamma_e = 16 \text{ kN/m}^3$, $\gamma_m = 21 \text{ kN/m}^3$, $r_t = 22 \text{ kN/m}^3$, $\mu_m = 0.4$, $\mu = 0.4$, 滑体以下为稳定土层, $f_k = 250 \text{ kpa}$, 试设计一格仓式浆砌片石抗滑挡墙。

3.1 决定 b 、 h 、 d 、 h_1 诸值

设 $a = 0.2$, $H_1 = 5.5$, $h_{f1} = 1.5$, $i = 0.1$,

则

$$B = h + 2a = h + 0.4$$

$$W_f = 0.5bB(2h_{f1} - iB) \gamma_f =$$

$$0.5b(h + 0.4)[2 \times 1.5 - 0.1(h + 0.4)] = b(32.12h + 13.024 - 1.1h^2) \quad (22)$$

先假定每一计算单元 A_m 与 A_{e1} 的面积之比为 6:4 (根据经验暂定), 即 $A_m/bh = 0.6$, $A_{e1}/bh = 0.4$, 故

$$W_u = b \left[\left(\frac{A_m}{bh} \gamma_m + \frac{A_{e1}}{bh} \gamma_e \right) hH_1 + a\gamma_e H_1 \right] =$$

$$b[104.5h + 17.6]$$

$$W_u + W_f = b[136.62h + 30.624 - 1.1h^2]$$

挡墙首先应满足抗滑移的要求, 必须符合下式:

$$W_u + W_f \geq bF(\lambda \cos \beta - \sin \beta)$$

$$\lambda = \frac{1.3 - \mu_i}{\mu + 1.3i} = 2.377 \text{ (或查[3]表4)}$$

$$\begin{aligned} \text{故 } bF(\lambda \cos \beta - \sin \beta) &= \\ b \cdot 430(2.377 \cos 13^\circ - \sin 13^\circ) &= \\ b \cdot 899.184 \end{aligned}$$

$$b[136.62h + 30.624 - 1.1h^2] \geq b \cdot 899.184$$

经化简整理后, 可得下列方程式:

$$1.1h^2 - 136.62h + 868.560 \leq 0$$

$$\text{解得 } h \geq [136.62 -$$

$$\sqrt{(136.62)^2 - 4 \times 1.1 \times 868.560}] \setminus$$

$$2 \times 1.1 = 6.72, \text{ m}$$

暂定 $h = 7 \text{ m}$, 并设 $d = 2 \text{ m}$, $h_1 = 3 \text{ m}$, $t = 1 \text{ m}$, 求得:

$$b = \frac{A_{e1}}{0.4h} = \frac{d(h_1 + 0.25\pi d)}{0.4h} = \frac{2(3 + 0.25\pi \times 2)}{0.4 \times 7} = 3.265, \text{ m}$$

拟采用 $b = 3.2 \text{ m}$, $h = 7 \text{ m}$, $d = 2 \text{ m}$, $h_1 = 3 \text{ m}$ 。

3.2 抗滑移稳定验算

$$\begin{aligned} bF(\lambda \cos \beta - \sin \beta) &= \\ (3.2)(430)(2.377 \cos 13^\circ - \sin 13^\circ) &= \\ 2877.390, \text{ kN} \end{aligned}$$

用公式 (5) ~ (9) 算出 $W_u + W_f = 2980.8, \text{ kN} > 2877.390 \text{ kN}$, 由此可知抗滑移安全系数 K_s 必稍大于 1.3, 不必再算。

3.3 抗倾覆稳定验算

$$\begin{aligned} M_0 = bF \cos \beta (H - 0.5H_0 - iB) &= \\ (3.2)(430) \cos 13^\circ (7 - 0.5 \times 5 - & \\ 0.1 \times 7.4) &= 5041.157, \text{ kN} \cdot \text{m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{用公式 (12) ~ (15) 算出 } \sum M_r &= \\ 13698.078, \text{ kN} \cdot \text{m} \end{aligned}$$

$$K_0 = \frac{\sum M_r}{M_0} = \frac{13698.078}{5041.157} =$$

$$2.717 > 1.5$$

3.4 墙身强度验算

3.4.1 法向应力计算

$$N_1 = A_m \gamma_m H_1 + bF \sin \beta =$$

$$(13.258)(21)(5.5) + (3.2)(430) \sin 13^\circ =$$

$$1840.832, \text{ kN}$$

$$M_1 = 0.5bF [(2H_1 - H_0) \cos \beta - h \sin \beta] =$$

$$(0.5)(3.2)(430) [(2 \times 5.5 - 5) \times \cos 13^\circ -$$

$$7 \sin 13^\circ] = 2938.835, \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$W_x = \frac{1}{6h} \left[(bh^3 - dh_1^3) - \frac{d^2}{16}(3\pi d^2 + 32h_1d + 12\pi h_1^2) \right] = 21.461, \text{ m}^3$$

$$\sigma_{\min}^{\max} = \frac{N_1}{A_m} \pm \frac{M_1}{W_x} = \frac{1840.832}{13.258} \pm \frac{2938.835}{21.461} =$$

$$138.847 \pm 136.938, \text{ kPa}$$

$$e_0 = \frac{M_1}{N_1} = \frac{2938.835}{1840.832} = 1.596, \text{ m}$$

$$K = 1 + 1.5 \frac{e_0}{y} = 1 + 1.5 \frac{1.596}{3.5} =$$

$$1.684 > 1.25, \quad K \text{ 以 } 1.25 \text{ 计。}$$

设采用 MU₃₀ 片石、M₅ 砂浆砌筑,

查表 1, $[\sigma_a] = 0.8 \text{ MPa}$

$$K[\sigma_a] = (1.25)(0.8) =$$

$$1.0, \text{ MPa} > \sigma_{\min}^{\max}, \text{ 安全。}$$

3.4.2 剪切应力计算

$$N_0 = A_m \gamma_m H_0 + bF \sin \beta =$$

$$(13.258)(21)(5) + (3.2)(430) \sin 13^\circ =$$

$$1071.623, \text{ kN}$$

$$\tau_{\max} = \frac{bF \cos \beta - N_0 \mu_m}{A_m} =$$

$$\frac{(3.2)(430) \cos 13^\circ - (1071.623)(0.4)}{13.258} =$$

$$68.795, \text{ kPa} = 0.07, \text{ MPa} < [\sigma_j]$$

$$[\sigma_j] = 0.08 \text{ MPa (查表 2)}$$

3.4.3 横隔墙抗拉验算

假定格仓内填土的 $\varphi = 30^\circ$,

$$\text{故 } K_a = \tan^2(45^\circ - \varphi/2) = \frac{1}{3}.$$

今验算横隔墙底 0.5 m 范围内的拉应力,

$$\text{即 } h_{e2} = 5.5, h_{e1} = 5.0,$$

代入式(25), 得:

$$\sigma_1 = \frac{k_a \gamma_e d (h_{e2} + h_{e1})}{2(b-d)} =$$

$$\left(\frac{1}{3}\right) \frac{(16)(2)(5.5+5)}{2(3.2-2)} =$$

$$46.7, \text{ kPa} = 0.05, \text{ MPa} < [\sigma_l]$$

$$[\sigma_l] = 0.08 \text{ MPa (查表 2)}$$

已知地基承载力标准值 $f_k = 250 \text{ kPa}$, 地基应力验算从略。

4 结 语

①在滑坡推力计算中, 滑动面上土的抗剪强度指标 c 、 φ 值和滑坡推力安全系数 k_t 是三个至关重要的参数。参考文献[5]中对 c 、 φ 和 k_t 的选用有详细论述, 可供参考。

②格仓中的填土不宜任意倾倒, 应分层夯实以达到足够的密实度。

③滑坡的治理除了支挡外, 尚有排水(包括地面水和地下水)、卸载、反压(其实重力式支挡结构有支挡和反压双重作用。)植被、护坡等措施, 应采用综合治理, 方能奏效。

④必须说明一点: 笔者认为格仓式抗滑挡墙, 每一计算单元的截面为工字型, 宜用容许应力法计算其压弯组合应力。

参 考 文 献

- 1 工程地质手册编写组. 工程地质手册. 北京: 中国建筑工业出版社, 1982 235
- 2 中华人民共和国原城乡建设环境保护部. GBJ7-89 建筑地基基础设计规范. 北京: 中国建筑工业出版社, 1989 39
- 3 李钧民. 重力式挡土墙设计经验谈. 岩土工程技术, 1998(2): 3~8
- 4 [美] H F 温特科恩, 方晓阳. 基础工程手册. 钱鸿缙, 叶书麟等译校. 北京: 中国建筑工业出版社, 1983, 541
- 5 李钧民. 镇江市山体滑坡产生原因及治理. 军工勘察. 1994, (1): 30~32

收稿日期: 1999-05-02