

图2 $\sigma_1 - \sigma_3$ 下的应力路径

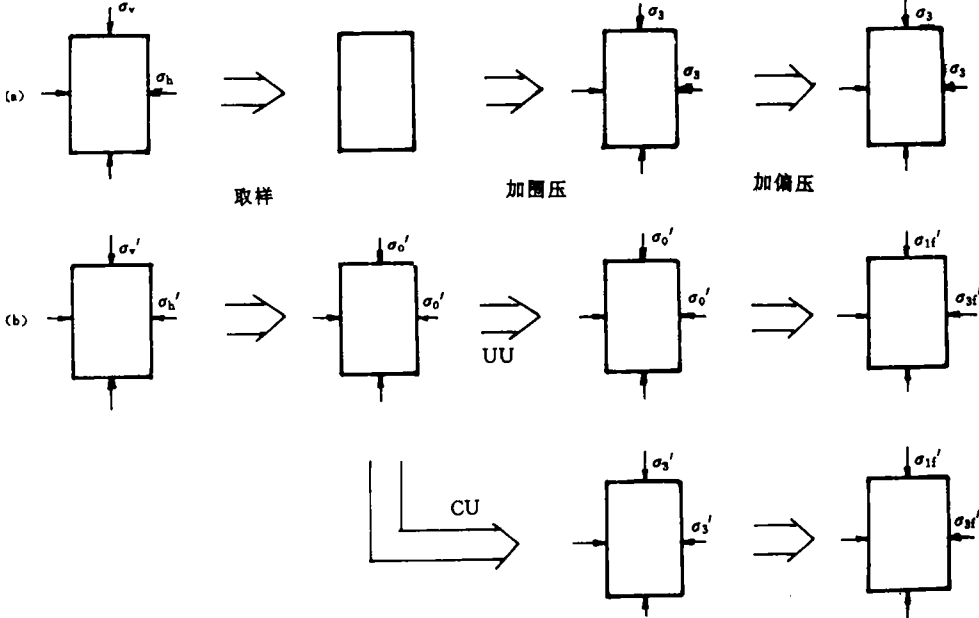


图3 天然、取土、加围压、加偏压应力下的应力

(a)总应力 (b)有效应力

设有效应力极限应力圆与有效应力强度包线切点处的应力为 $(\sigma'_{ef}, \tau_{ef})$,总应力极限应力圆与固结不排水剪总应力强度包线切点处应力为 (σ_{tf}, τ_{tf}) ,如图4。则有:

$$\tau_{ef} = c_u \cos \phi' \quad (7a)$$

$$\tau_{tf} = c_u \cos \phi_{tu} \quad (7b)$$

$$\sigma_{tf} = \frac{\sigma'_{1f} + \sigma'_{3f}}{2} - c_u \sin \phi_{tu} \quad (8a)$$

$$\sigma'_{ef} = \frac{\sigma'_{1f} + \sigma'_{3f}}{2} - c_u \sin \phi'$$

$$\text{故 } \sigma'_{1f} = \sigma'_v - \Delta \sigma_{3f} (1 - A_{fp}) \quad (3a)$$

$$\sigma'_{3f} = k_o \sigma'_v + A_{fp} \Delta \sigma_{3f} \quad (3b)$$

式中: u ——天然状态孔压;
 Δu_f ——破坏时超静孔压;
 A_{fp} ——平面应变破坏时孔压系数。

据莫尔-库仑准则:

$$\sin \phi' = \frac{\sigma'_{1f} - \sigma'_{3f}}{\sigma'_{1f} + \sigma'_{3f} + 2c' \operatorname{ctg} \phi'} \quad (4)$$

不排水强度 $c_{u(a)}$ 为:

$$c_{u(a)} = \frac{\sigma_{1f} - \sigma_{3f}}{2} = \frac{1 - k_o}{2} \sigma'_v - \frac{1}{2} \Delta \sigma_{3f} \quad (5)$$

由(3)、(4)、(5)得:

$$c_{u(a)} = \frac{c' \cos \phi' + \sigma'_v \sin \phi' [k_o + A_{fp}(1 - k_o)]}{1 + (2A_{fp} - 1) \sin \phi'} \Delta \sigma_{3f} \quad (6)$$

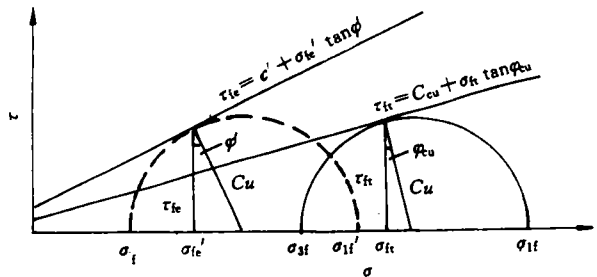


图4

$$\sigma'_{ef} = \frac{\sigma'_{1f} + \sigma'_{3f}}{2} - c_u \sin \phi_{tu} \quad (8b)$$

$$\tau_{cf} = c' + \sigma'_{cf} \operatorname{tg} \varphi' \quad (9a)$$

$$\tau_{cf} = c_{cu} + \sigma_{cf} \operatorname{tg} \varphi_{cu} \quad (9b)$$

由式(1)、(3)、(5)~(9),并令 $c_{cu} = c_{cu(a)}$ 、 $\varphi_{cu} = \varphi_{cu(a)}$ 得:

$$\sin \varphi_{cu(a)} = \frac{\sin \varphi' [k_0 + A_{fp} (1 - k_0)]}{1 + \sin \varphi' (1 + k_0) (A_{fp} - 1) + m [1 + (2A_{fp} - 1) \sin \varphi']} \quad (10a)$$

$$c_{cu(a)} = c' \cos \varphi_{cu(a)} \left\{ \frac{1}{\cos \varphi'} + \frac{1}{1 + (2A_{fp} - 1) \sin \varphi'} \left[\operatorname{tg} \varphi' (1 - 2A_{fp} - \sin \varphi') \right. \right. \\ \left. \left. + \frac{\sin \varphi' \cos \varphi' (1 + \sin \varphi_{cu(a)}) [k_0 + A_{fp} (1 - k_0)]}{1 + \sin \varphi' (1 + k_0) (A_{fp} - 1) + m [1 + (2A_{fp} - 1) \sin \varphi']} - [k_0 + A_{fp} (1 - k_0)] \sin \varphi' \sin \varphi_{cu(a)} \right] \right\} \quad (10b)$$

式中: $m = \frac{u}{\sigma'_v} = \frac{\gamma_w}{\gamma'}$, 其值较稳定, 约等于 1。 故 $\sigma'_{1f} = k_0 \sigma'_v + \Delta \sigma_{1f} (1 - A_{fp}) \quad (13a)$

2.2 被动极限平衡时的强度指标 $c_{u(p)}$ 与

$$\sigma'_{3f} = \sigma'_v - A_{fp} \Delta \sigma_{1f} \quad (13b)$$

$$\sigma'_{3f} = \sigma'_v - A_{fp} \Delta \sigma_{1f} \quad (13b)$$

$c_{cu(p)}$ 、 $\varphi_{cu(p)}$

如图 1, 被动极限平衡时的应力如下:

$$\sigma_{1f} = p_p = k_0 \sigma'_v + u + \Delta \sigma_{1f} \quad (11a)$$

$$\sigma_{3f} = \sigma_v = \sigma'_v + u \quad (11b)$$

不排水强度 $C_{u(p)}$ 为:

$$c_{u(p)} = \frac{\sigma_{1f} - \sigma_{3f}}{2} = \frac{k_0 - 1}{2} \sigma'_v + \frac{1}{2} \Delta \sigma_{1f} \quad (14)$$

因为 $\Delta u_f = A_{fp} \Delta \sigma_{1f} \quad (12)$

由式(4)、(13)、(14)得:

$$c_{u(p)} = \frac{c' \cos \varphi' + \sigma'_v \sin \varphi' [1 + A_{fp} (k_0 - 1)]}{1 + (2A_{fp} - 1) \sin \varphi'} \quad (15)$$

应用式(7)~(9)并令 $c_{cu} = c_{cu(p)}$ 、 $\varphi_{cu} = \varphi_{cu(p)}$ 及式(11)、(13)~(15)可得:

$$\sin \varphi_{cu(p)} = \frac{\sin \varphi' [1 + A_{fp} (k_0 - 1)]}{k_0 + \sin \varphi' (1 + k_0) (A_{fp} - 1) + m [1 + (2A_{fp} - 1) \sin \varphi']} \quad (16a)$$

$$c_{cu(p)} = c' \cos \varphi_{cu(p)} \left\{ \frac{1}{\cos \varphi'} + \frac{1}{1 + (2A_{fp} - 1) \sin \varphi'} \left[\tan \varphi' (1 - 2A_{fp} - \sin \varphi') \right. \right. \\ \left. \left. + \frac{\sin \varphi' \cos \varphi' (1 + \sin \varphi_{cu(p)}) [1 + A_{fp} (k_0 - 1)]}{k_0 + \sin \varphi' (1 + k_0) (A_{fp} - 1) + m [1 + (2A_{fp} - 1) \sin \varphi']} - [1 + A_{fp} (k_0 - 1)] \sin \varphi' \sin \varphi_{cu(p)} \right] \right\} \quad (16b)$$

2.3 室内三轴压缩的强度指标 c_u 与 c_{cu} 、 φ_{cu}

$$c_u = \frac{c' \cos \varphi' + \sigma'_v [k_0 + A_0 (1 - k_0)] \sin \varphi'}{1 + (2A_{fT} - 1) \sin \varphi'} \quad (22)$$

2.3.1 UUC 试验的强度指标 c_u

2.3.2 CUC 试验的总应力强度指标 c_{cu} 、 φ_{cu}

取土过程中的超静孔压 $u_0 = -\sigma'_v [k_0 + A_0 (1 - k_0)] \quad (17)$

破坏时的应力为:

式中: A_0 ——取土时孔压系数

$$\sigma_{1f} = \sigma_{3f} + \Delta \sigma_{1f} \quad (23)$$

$$u_f = A_{fT} \Delta \sigma_{1f} \quad (23)$$

对 UU 剪 $\sigma_{1f} = \sigma_{3f} + \Delta \sigma_{1f} \quad (18)$

$$\sigma'_{1f} = \sigma_{3f} + \Delta \sigma_{1f} (1 - A_{fT}) \quad (24a)$$

$u_f = \sigma_{3f} + A_{fT} \Delta \sigma_{1f} + u_0 \quad (19)$

$$\sigma'_{3f} = \sigma_{3f} - A_{fT} \Delta \sigma_{1f} \quad (24b)$$

$\sigma'_{1f} = \Delta \sigma_{1f} (1 - A_{fT}) + \sigma'_v [k_0 + A_0 (1 - k_0)] \quad (20a)$

根据式(4)、(7)~(9)、(18)、(21)、(24)

$\sigma'_{3f} = \sigma'_v [k_0 + A_0 (1 - k_0)] - A_{fT} \Delta \sigma_{1f} \quad (20b)$

可以得出下列关系式:

$$c_u = \frac{\sigma_{1f} - \sigma_{3f}}{2} = \frac{1}{2} \Delta \sigma_{1f} \quad (21)$$

$$\sin \varphi_{cu} = \frac{\sin \varphi'}{1 + 2A_{fT} \sin \varphi'} \quad (25a)$$

由式(4)、(20)、(21)得:

$$c_u = c' \cos \varphi_{cu} \left\{ \frac{1}{\cos \varphi'} + \frac{\tan \varphi' (1 - 2A_{fT} - \sin \varphi')}{1 + (2A_{fT} - 1) \sin \varphi'} - \frac{\sin \varphi' \cos \varphi' (1 - \sin \varphi_{cu})}{[1 + (2A_{fT} - 1) \sin \varphi'] (1 + 2A_{fT} \sin \varphi' - \sin \varphi' \sin \varphi_{cu})} \right\} \quad (25b)$$

2.4 室内常规三轴压缩指标与主、被动极限平衡实际应力路径下强度指标的差异

利用式(6)、(10)、(15)、(16)、(22)、(25)可算得室内 UU 试验指标 c_u 、CU 试验指标 c_{cu} 、主动极限平衡强度指标 $c_{u(a)}$ 、 $c_{cu(a)}$ 、 $\varphi_{u(a)}$ 和被动极限平衡强度指标 $c_{u(p)}$ 、 $c_{cu(p)}$ 、 $\varphi_{u(p)}$ 。影响这些指标的参数包括 c' 、 φ' 、 A_{fT} 、 A_o 。研究表明 $A_o = -0.1 \sim 0.3$ ， $k_o = 1 - \sin \varphi'$ ， $A_{fT} = 0.7$

~ 1.3 (正常固结土) 或 $0.3 \sim 0.7$ (超固结土)，而利用 Henkel 孔压系数不随应力第三不变量变化可得出 $A_{fT} = \frac{\sqrt{3}}{2} [A_{fT} + \frac{1}{3}(\sqrt{3}-1)]$ 。根据上述成果可得出表 1 所示的成果，从中可以看出：

表 1 强度指标对比表

c'/KPa	$\varphi'/(^{\circ})$	A_{fT}	$\frac{c'}{\sigma'_v}$	A_o	$\frac{c_u}{\sigma'_v}$	$\frac{c_{u(a)}}{\sigma'_v}$	$\frac{c_{u(p)}}{\sigma'_v}$	c_{cu}	$c_{cu(a)}$	$c_{cu(p)}$	$\varphi_{cu}/(^{\circ})$	$\varphi_{cu(a)}/(^{\circ})$	$\varphi_{cu(p)}/(^{\circ})$
0	30	0.7	0	-0.1	0.19	0.34	0.22	0	0	0	17.1	12.0	10.0
				0.3	0.27								
		1.3		-0.1	0.12	0.32	0.09	0	0	0	12.6	11.0	3.7
				0.3	0.18								
30	15	0.7	1.0	0.2	1.02	1.03	0.96	21.7	27.9	27.4	11.0	6.5	5.5
			0.2	0.32	0.37	0.30							
		-0.5	1.0	0.2	2.32	1.70	2.00	41.7	50.8	74.2	20.4	5.0	26.1
			0.2		0.72	0.47	0.77						

(1) 对正常固结土，UU 指标一般有 $\frac{c_{u(p)}}{\sigma'_v} < \frac{c_u}{\sigma'_v} < \frac{c_{u(a)}}{\sigma'_v}$ 的规律，且 A_{fT} 、 A_o 值越大，相对差值越大；室内 CU 试验总应力强度指标 φ_{cu} 较现场主动与被动极限平衡时的 $\varphi_{u(a)}$ 和 $\varphi_{u(p)}$ 均大，有 $\varphi_{cu} > \varphi_{u(a)} > \varphi_{u(p)}$ 的关系， A_{fT} 越大， $\varphi_{cu} - \varphi_{u(p)}$ 越大，而 $\varphi_{cu} - \varphi_{u(a)}$ 则越小。

(2) 对超固结土，室内 UU 和 CU 强度指标与现场破坏时的实际强度指标也有明显差异，但其关系较为复杂，且 UU 指标的差别情况还与 σ'_v (深度) 有关。

3 常规三轴压缩指标计算土压力时的偏差

众所周知，土压力强度 p_a 、 p_p 公式为：

$$p_a = \gamma z k_a - 2c \sqrt{k_a}$$

$$p_p = \gamma z k_p + 2c \sqrt{k_p}$$

对水土合算时的饱和土， $\gamma = \gamma_m$ 。若用不排水指标，则 $k_a = k_p = 1$ ， $c = c_u$ 。用 c_u 代替 $c_{u(a)}$ 和 $c_{u(p)}$ 时的计算误差为：

$$\delta p_a = \frac{(\gamma_m z - 2c_u) - (\gamma_m z - 2c_{u(a)})}{\gamma_m z - 2c_{u(a)}} \times 100\% \quad (26a)$$

$$\doteq \frac{c_u - c_{u(a)}}{\sigma'_v} \times 100\% \quad (\text{取 } \gamma_m \doteq 2\gamma')$$

$$\delta p_p = \frac{(\gamma_m z + 2c_u) - (\gamma_m z + 2c_{u(p)})}{\gamma_m z - 2c_{u(p)}} \times 100\%$$

$$\doteq \frac{\frac{c_{u(p)}}{\sigma'_v} - \frac{c_u}{\sigma'_v}}{1 + c_{u(p)}/\sigma'_v} \times 100\% \quad (\text{取 } \gamma_m \doteq 2\gamma') \quad (26b)$$

用 CU 指标时，对正常固结土， $c_{cu} = c_{cu(a)} = c_{cu(p)} = 0$ ，故用 φ_{cu} 代替 $\varphi_{u(a)}$ 和 $\varphi_{u(p)}$ 时的计算误差：

$$\delta p_a = \frac{\tan^2\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi_{cu}}{2}\right) - \tan^2\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi_{u(a)}}{2}\right)}{\tan^2\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi_{u(a)}}{2}\right)} \quad (27a)$$

$$\delta p_p = \frac{\tan^2\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi_{cu}}{2}\right) - \tan^2\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi_{u(p)}}{2}\right)}{\tan^2\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi_{u(p)}}{2}\right)} \quad (27b)$$

将表 1 中正常固结土的强度指标代入式 (26)、(27) 可求得用室内指标计算土压力强度时的误差如表 2。

表 2 应用室内指标计算的误差

A_{fT}	指标	A_o	$\delta p_a/\%$	$\delta p_p/\%$
0.7	UU	-0.1	-22.7	2.5
	CU	0.3	-10.6	-4.1
1.3	UU	-0.1	-29.4	-2.7
	CU	0.3	-20.5	-8.3
			-5.9	37.4

表 2 可见，室内三轴压缩指标应用于水土合算时可能引起程度不同的误差。一般而言，对正常固结土，用室内 UU 指标计算 p_p

边坡岩体质量分类的 SMR 法及其应用实例

黄昌乾

(中航勘察设计研究院,北京 100086) (中国兵器工业勘察设计研究院,北京 100053)

范建军

丁恩保

(中国科学院地质研究所,北京 100029)

【摘要】 为评价边坡稳定性,详细、系统地介绍了边坡岩体质量评价分类的 SMR 方法,且给出了它的一个应用实例,实践证明,该法可行性、简便性好,值得推广。并根据工程实践,总结了该法的工作程序及其不足之处。

【关键词】 边坡岩体质量评价 不连续面边坡破坏模式

【Abstract】 A SMR method of slope rock mass quality evaluation, classification and a practical example are introduced in this paper, it is proved that the method is practical simply used, meanwhile the process and insufficiency of the method is pointed out.

【key words】 slope rock mass quality evaluation discontinuous surface model of slope failures

0 前言

边坡岩体质量分类与评价早已成为国内外有关学者的一个研究热点。边坡岩体质量分类最终目的是为了进行边坡岩体稳定性分析,其依据是岩体的结构特征。由于岩体结构分类能充分地反映本身地质特征,因而岩体质量评价能有效地用于岩体的稳定性分析。按照 Bieniawski Z·T· 的说法⁽¹⁾,岩体质量分类有以下几个方面的意义:

- (1)找出岩体特性的最重要影响因素;
- (2)把一定区域的岩体分成数段,各段内的岩体有相似的特征;

(3)为认识各等级的岩体提供一个基础;

(4)可把在一处遇到的岩体特征和工程经验与另一处的岩体相对照;

(5)为工程设计提供一种定量数据并具有一定的指导作用;

(6)为工程师与地质工作者间的交流提供一个基础。

把边坡岩体质量与稳定性有机地结合起来,继而根据岩体质量,提出比较合理的工程加固方案、措施,是当前岩质边坡工程地质研究的一个方向。目前,边坡岩体质量分类的方法有许多种,这里介绍其中之一——SMR

作者简介:黄昌乾:男 25 岁,助理工程师。1997 年 7 月毕业于中国科学院地质研究所,获硕士学位,主要从事水文地质、工程地质、岩土工程勘察设计与施工工作。

的误差相对较小,用 CU 指标计算 p_a 的误差较小(尤其是 A_f 较大时)。因此在某些条件下有必要考虑选用非三轴压缩指标。

4 结 语

室内三轴和现场主、被动极限平衡下的总应力强度指标均可用 c' 、 ϕ' 、 A_f 、 A_r 、 A_o 、 k_o 等

指标表达出来。现场破坏时的强度指标 c_u 、 c_{cu} 、 ϕ_{cu} 一般与室内三轴压缩指标有明显差异,水土合算法计算土压力时,室内指标的应用有时会引起显著误差。

收稿日期:1997-09-09