

裂隙粘土现场抗剪强度的确定

廖 济 川

(合肥工业大学)

一、前 言

裂隙粘土具有特殊的力学性质, 很难用一般室内剪切试验方法确定其抗剪强度。裂隙粘土多受超固结作用, 在其形成过程中, 土体分布着各种不同的裂隙。这些裂隙的长短、宽窄、数量、方向以及填充物等不尽相同, 不能用一种土样的强度代表整个裂隙土层的强度。裂隙粘土在开挖后, 由于卸荷、裂隙张开、体积变化和应力重分布等原因产生渐进破坏, 导致强度衰减。其衰减的程度也不能用室内剪切试验来确定。土体一旦滑坡, 在滑坡区的土体就受到不同程度的扰动, 土体结构也受到不同程度的破坏。即使土体裂隙分布的情况相同, 但在滑坡区的部位不同, 受到扰动的程度也不同, 因此试样的强度自然也不相同。

在裂隙粘土中, 存在着各种大小不同的“单元”及结构面。因此, 存在着各种不同涵义的强度^[1], 这就是: ①裂隙强度, 指土体沿着薄弱的裂隙面破坏, 其强度值常决定于破坏时的位移量, 通常略高于残余强度; ②均质强度, 在没有裂隙情况下的整块土样的强度, 其值与试样尺寸无关。对于裂隙土, 则只相当于裂隙之间土块的强度。但若裂隙很发育, 则不可能测出均质强度; ③工作强度, 即土体实际发挥的强度, 其值与试样尺寸有关。并且在理论上存在强度与试样尺寸之间的数学关系式, 随着尺寸的增大, 强度逐渐降低, 当试样面积趋于无限大时, 即为现场土体强度, 其值介于裂隙强度与均质强度之间。显然, 现场土体强度是裂隙土层中各种强度的综合。当用三轴剪切仪和直剪仪测定裂隙土样的抗剪强度时, 若土样没有裂隙, 则相当于均质强度; 若有裂隙, 则相当于裂隙强度或一定面积的工作强度。但三轴剪切仪测定的强度, 更易受到裂隙的影响, 用这二种仪器测出的室内土样强度, 当然不能代表裂隙土层的现场抗剪强度。所以, 比较合理的方法是利用滑坡的滑动面形态, 直接反算出能代表土体受到裂隙影响的现场抗剪强度; 或结合残余强度间接推算出现场抗剪强度。

二、用反算法确定现场抗剪强度指标

反算的方法不同, 得到的强度指标也不同。因此, 选用哪种反算法, 就成为确定强度指标的主要问题。通常的反算法, 是在滑坡区取一滑动断面, 用瑞典条分法写出计算抗滑安全系数 F 的公式

$$F = \frac{\operatorname{tg} \phi \cdot \sum W_i \cdot \cos \alpha_i + cL}{\sum W_i \cdot \sin \alpha_i} \quad (1)$$

式中 c , $\operatorname{tg} \phi$ 为土的凝聚力及内摩擦系数, L 为圆弧滑动面全长, F 为抗滑安全系数。反算时, 取 $F = 1$, 其余符号见图 1。瑞典条分法的缺点是没有考虑土条间的作用力, 因此, 只满足整个滑动体的力矩平衡条件, 而不满足每个土条受力的平衡条件。在瑞典条分法中, 通常将 F 定义为抗滑力矩与滑动力矩之比, 这个定义符合工程上习用的滑动面为圆弧的假定条件。后来考虑到土条之间存在着推力而采用传递系数法, 它适用折线形的滑动面, 计算公式为

$$E_i = W_i \sin \alpha_i + Q_i \cos \alpha_i - \left[\frac{c_i l_i}{F} + \frac{(W_i \cos \alpha_i - Q_i \sin \alpha_i) f_i}{F} \right] + E_{i-1} \psi_{i-1} \quad (2)$$

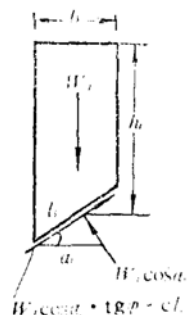


图 1

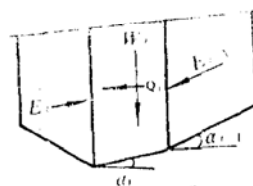


图 2

式中
$$\psi_{i-1} = \cos(\alpha_{i-1} - \alpha_i) - \frac{f_i}{F} \cdot \sin(\alpha_{i-1} - \alpha_i) \quad (3)$$

E_{i-1} , E_i 为第 $i-1$, i 土条的不平衡推力, 方向分别与第 $i-1$, i 条滑动面平行, 其余符号见图 2。反算时取 $F = 1$, 由上而下逐条计算, 即 $i = 1 \sim n$, 由算得的 E_{i-1} 代入 E_i 。最后, 在 $i = n$ 的土条中要求 $E_n = 0$, 即

$$W_n \sin \alpha_n + Q_n \cos \alpha_n - [c_n l_n + (W_n \cos \alpha_n - Q_n \sin \alpha_n) f_n] + E_{n-1} \psi_{n-1} = 0 \quad (4)$$

因为假设每土条的不平衡推力与滑动面平行, 所以在滑动面较陡的情况下, 土条垂直分界面上的垂直分力可能超过分界面上的极限剪切分力, 从而得出不合理的结果^[2]。

当用一个滑动断面列出式(1)或式(2)时, 由于在一个式中不能同时解出 c 和 ϕ , 故必需假设 c 或 ϕ , 解出 ϕ 或 c 。这样, 可求出无穷组的 c 、 ϕ 解。人们只能凭经验选用合适的值。这种确定强度指标的方法, 存在着很大的人为误差。近来有采用二个滑动断面, 各按式(1)或式(2)写出一个式子, 联立解出 c 、 ϕ ^[3]。这比人为假设一值而算出另一值的方法要可靠得多。但是, 仍不能消除瑞典法或传递系数法本身存在的缺点。

由于这些原因,在滑坡计算中,国内外也比较普遍地采用毕晓普(Bishop)方法。和上面二法相比,毕晓普方法考虑到土条间的作用力,土条受力如图3。 W_i 、 Q_i 及 U_i 为作用于第*i*条的外力; N_i 及 S_i 为沿剪切面的法向力及切向力; F 为抗滑安全系数,定义为沿剪切面的平均抗剪强度与平均剪应力之比。滑动面上所能发挥的剪切力为

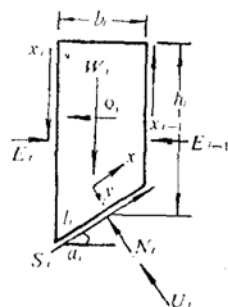


图3

$$S_i = \frac{1}{F}(c_i l_i + \operatorname{tg} \phi_i N_i) \quad (5)$$

将上述诸力沿 x 方向投影,平衡条件为

$$\begin{aligned} S_i &= W_i \sin \alpha_i + Q_i \cos \alpha_i + (X_i - X_{i-1}) \sin \alpha_i - (E_i - E_{i-1}) \cos \alpha_i \\ &= W_i \sin \alpha_i + Q_i \cos \alpha_i + \Delta X_i \sin \alpha_i - \Delta E_i \cos \alpha_i \end{aligned} \quad (6)$$

或

$$\Delta E_i = \frac{1}{\cos \alpha_i} (W_i \sin \alpha_i + Q_i \cos \alpha_i + \Delta X_i \sin \alpha_i - S_i)$$

将式(5)代入上式,得

$$\Delta E_i = W_i \operatorname{tg} \alpha_i + Q_i + \Delta X_i \operatorname{tg} \alpha_i - \frac{1}{F}(c_i l_i + N_i f_i) - \frac{1}{\cos \alpha_i} \quad (7)$$

沿 y 方向投影,平衡条件为

$$N_i = W_i \cos \alpha_i - Q_i \sin \alpha_i + \Delta E_i \sin \alpha_i + \Delta X_i \cos \alpha_i - U_i \quad (8)$$

将式(7)代入式(8),得

$$N_i = (W_i - \frac{c_i l_i \sin \alpha_i}{F} + \Delta X_i - U_i \cos \alpha_i) \cos \alpha_i + \frac{f_i \sin \alpha_i}{F} \quad (9)$$

在滑坡体中 $\sum \Delta E_i = 0$, 所以,

$$\begin{aligned} \sum \Delta E_i &= \sum W_i \operatorname{tg} \alpha_i + \sum Q_i + \sum \Delta X_i \operatorname{tg} \alpha_i \\ &\quad - \frac{1}{F} \sum (c_i l_i + N_i f_i) - \frac{1}{\cos \alpha_i} = 0 \\ F &= \frac{\sum (c_i l_i + N_i f_i) - \frac{1}{\cos \alpha_i}}{\sum W_i \operatorname{tg} \alpha_i + \sum Q_i + \sum \Delta X_i \operatorname{tg} \alpha_i} \end{aligned} \quad (10)$$

将式(9)代入式(10),得

$$F = \frac{\sum [c_i b_i + (W_i + \Delta X_i - U_i \cos \alpha_i) f_i] \cdot \frac{\sec^2 \alpha_i}{1 + \frac{f_i \tan \alpha_i}{F}}}{\sum W_i \tan \alpha_i + \sum Q_i + \sum \Delta X_i \tan \alpha_i} \quad (11)$$

上式即为毕晓普的滑坡计算公式。为便于求解, 假设土条间的竖直反力 $\Delta X_i = 0$, 式(11)成为简化的毕晓普公式

$$F = \frac{\sum [c_i b_i + (W_i - U_i \cos \alpha_i) f_i] \cdot \frac{\sec^2 \alpha_i}{1 + \frac{f_i \tan \alpha_i}{F}}}{\sum W_i \tan \alpha_i + \sum Q_i} \quad (12)$$

沿滑动面各处的强度指标可认为一样, 故 $c_i = c$, $f_i = f$ 。取 $F = 1$, 即得出简化的毕晓普方法的反算公式

$$\sum W_i \tan \alpha_i + \sum Q_i = \sum [c b_i + (W_i - U_i \cos \alpha_i) f] \cdot \frac{\sec^2 \alpha_i}{1 + f \tan \alpha_i} \quad (13)$$

式(13)中有二个未知数 c 及 f , 所以采用双断面列出二个方程式(13), 联立用图解法解出 c 及 f 。还可将得出的 c 及 f 值, 在 $F = 1$, $\Delta X_i = 0$ 时, 用式(9)、(5)及(7)算出滑动时作用在各土条上的法向力 N_i 、剪切力 S_i 及不平衡推力 ΔE_i 。

上面的推导是在 $\sum \Delta E_i = 0$, 而不是对圆心取力矩的条件下得出的, 故适用于土条底部为任何形状的滑动面。多数土坡的滑动面呈曲线形。当滑坡全部发生在裂隙土层中, c 及 f 为裂隙土层中的强度指标。若裂隙土层的下面为硬土层或软土层, 有可能一部分滑动面发生在裂隙土层中, 其滑动面仍呈曲线形; 而另一部分滑动面沿着两个土层之间的接触面, 其滑动面成为直线形。在接触面两侧, 土层的强度不一样, 接触面的强度受低强度土层控制^[4]。因此, 若裂隙土层的下面为硬土层, 则整个滑动面的强度可视为裂隙土层的强度。若裂隙土层的下面为软土层, 则沿着直线形滑动面的强度应取软土层的强度。在分段列出式(13)时, 软土的强度指标作为已知值, 反算出裂隙土层的强度指标。

若不考虑土条间作用力, 即 $\Delta E_i = \Delta X_i = 0$, 并设 $Q_i = U_i = 0$, 结果得出和式(1)相同的式子。由此可知, 式(1)中的安全系数 F 对任何形状的滑动面仍表示为滑动面上平均抗剪强度与平均剪应力之比, 而对圆弧滑动面, 还可以表示为抗滑力矩与滑动力矩之比。

上述诸方法对土条受力条件的考虑都不相同, 故据此反算出的强度指标自不相同。较合理的方法是简化的毕晓普反算法(本文简称为BC法)。反算法中选择计算断面时, 要采用几何形状及滑动面形态不完全相同的两个滑坡断面。否则, 就解不出 c , ϕ 值。

三、用残余系数表达裂隙土强度衰减的问题

裂隙粘土由于渐进破坏导致滑动时的强度衰减, 斯肯普顿 (Skempton) 用残余系数 R 表征裂隙粘土层强度衰减的程度。

$$R = \frac{\tau_f - \bar{\tau}}{\tau_f - \tau_r} \quad (14)$$

式中 τ_f 及 τ_r 分别为土层的峰值抗剪强度及残余强度, $\bar{\tau}$ 为滑动时滑动面上的平均剪应力, 即现场抗剪强度。应用式(14)存在的问题是如何确定 R 式中各项的值。

(一) 峰值强度 τ_f

在没有裂隙的均质土层中, 试样的峰值强度可代表该土层峰值强度指标。但在裂隙土层中则不然, 在裂隙土层中, 因裂隙纵横交错, 分布不规则, 甚至在裂隙中分布着各种填充物。在裂隙土层表面, 还可能因干湿效应而引起风化。结果, 使得在裂隙土层中存在着各种不同类型的强度指标, 不可能以某一试样的峰值强度代表裂隙土层的峰值强度指标。所以, 裂隙土层的峰值强度是一个较难确定的值。

(二) 残余强度 τ_r

1937年蒂德曼 (Teidemann) 首次用原状土测试残余强度、1964年经斯肯普顿应用于滑坡计算。斯肯普顿用直剪仪对固结后的土样缓慢地进行大位移的排水剪, 使土样逐渐产生定向排列。土样在跨过峰值强度后, 下降到最后稳定的值, 此强度即为残余强度 τ_r , 用 ϕ_r 及 c_r 表示其强度指标, 则 $\tau_r = \sigma \cdot \tan \phi_r + c_r$ 。斯肯普顿试验的结果是 c_r 很小, 可以近似地认为 $c_r = 0$; 而 ϕ_r 仅取决于粘粒含量及成分, 与土的应力历史、结构性及含水量无关^[5]。国内一些研究也得出类似的结论。但随加荷方式不同及剪切速率的增加, $c_r \geq 0$, 而且 c_r 及 ϕ_r 值与土的液限、塑性指数及含水量有关。有的研究者提出一些估计 c_r 及 ϕ_r 的经验公式^[6]。

在裂隙粘土层中虽存在着各种类型的峰值强度, 但产生这些类型峰值强度的土样, 除裂隙填充物外, 其粘粒含量及成分可认为是相同的, 故它们具有相同的残余强度。裂隙填充物本身虽有较多的粘粒含量, 但随着粘粒含量的增加, 残余强度与峰值强度的比值减少。如当正应力 $\sigma = 196 \text{ kPa}$ 时, 在重粘土中, 这个比值在 25~30% 之间, 在轻粘土中, 则为 35~50%^[6]。这样, 在裂隙土层中, 尽管有各种不同类型的峰值强度, 但其残余强度可近似地认为相同, 或者说残余强度之间的差别明显地少于峰值强度之间的差别。所以, 用裂隙土样测出的残余强度, 可以代表裂隙土层的残余强度。

(三) 平均剪应力 $\bar{\tau}$ 及平均法向应力 $\bar{\sigma}$

沿滑动面 $\bar{\tau}$ 及 $\bar{\sigma}$ 的确定可以有两种方法: 一种是不考虑土条间作用力, 只需一个滑坡断面, 按式(6)、(8)计算 S_i 及 N_i , 方法简单; 另一种是考虑土条间法向作用力, 需用两个滑坡断面, 按式(13)反算出 c 及 $\tan \phi$, 再按式(6)、(9)计算 S_i 及 N_i 。这是较合理的方法, 但计算繁复。然后按下式计算 $\bar{\tau}$ 及 $\bar{\sigma}$:

$$\left. \begin{aligned} \bar{\tau} &= \frac{\sum S_i}{L} \\ \bar{\sigma} &= \frac{\sum N_i}{L} \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

由此可看出, 在 R 表达式中的各项, 除 ϕ_r 及 c_r 较为稳定外, 其它各项 ϕ_f 、 c_f 、 $\bar{\tau}$ 及 $\bar{\sigma}$ 都有不同的取值方法, 结果影响了 τ_f 及 τ_r , 使得 R 有较大的变动范围, 而且还不一定能真实反映出裂隙土层强度衰减的程度。

四、用超余系数确定现场抗剪强度

(一) 超余系数 T 的提出

如上所述, 在裂隙土层中, 各类土样的残余强度 τ_r 基本上是相同的。若在滑动面上部, 由风化作用而产生垂直裂隙时, 则在滑动面长度计算中应扣除裂隙影响的长度, 这样仍可近似地认为在实际滑动面上具有相同的 τ_r 值。如果以滑坡时的平均剪应力 $\bar{\tau}$ 与残余强度 τ_r 之比称为土的超余系数 T , 则

$$T = \frac{\bar{\tau}}{\tau_r} \quad (16)$$

T 的值为 $T \geq 1$, T 表示裂隙土层滑动面上实际抗剪强度超越残余强度的程度。 T 愈小, 土层的现场抗剪强度愈低。对某一种土, τ_f 值为一定时, 则 $\bar{\tau} \leq \tau_f$, 故 T 也意味着强度的衰减。超余的程度愈大, 强度的衰减愈小。由于 T 与 τ_f 无关, 故对不同种类的土, 不能根据 T 的大小比较其强度的衰减程度。这一点是 T 与 R 的意义不相同之处。

(二) 用超余系数 T 确定现场抗剪强度

1. 斯肯普顿方法

斯肯普顿^[5]对发生于伦敦粘土的滑坡进行研究之后, 得出经过风化或有节理及裂缝的裂隙粘土会导致斜坡的逐渐破损的结论, 在极限情况下达到残余强度。如果土体已经破坏, 则不管哪种粘土, 此后土体沿着现存滑动面的任何运动, 都由残余强度来控制。因此, 斯肯普顿得出裂隙粘土的残余系数 $R \approx 1$ 或 $R < 1$ 。由滑坡反算或由工程实践的经验确定 R 之后, 反过来又用 R 确定强度指标, 作为设计斜坡之用。斯肯普顿在研究肯沙尔草原 (Kensal Green) 滑坡时, 取滑坡土的峰值强度指标为 $c_f = 320 \text{ lbf/ft}^2 (15.32 \text{ kPa})$, $\phi_f = 20^\circ$; 残余强度指标为 $c_r = 0$, $\phi_r = 16^\circ$; 滑动面上的平均剪应力 $\bar{\tau} = 380 \text{ lbf/ft}^2 (18.19 \text{ kPa})$, 平均法向应力 $\bar{\sigma} = 800 \text{ lbf/ft}^2 (38.30 \text{ kPa})$, 算出残余系数 $R = 0.61$ 。根据 R 值确定滑坡土的平均抗剪强度指标 $c = 125 \text{ lbf/ft}^2 (6 \text{ kPa})$, $\phi = 17.5^\circ$ 。斯肯普顿没有给出确定指标的公式, 但从其算例中可推断确定指标的方法。由 R 的定义, 可得

$$\begin{aligned} \bar{\tau} &= (1 - R)\tau_f + R\tau_r = (1 - R)(\bar{\sigma} \cdot \text{tg}\phi_f + c_f) + R(\bar{\sigma} \cdot \text{tg}\phi_r + c_r) \\ &= \bar{\sigma}[(1 - R)\text{tg}\phi_f + R\text{tg}\phi_r] + (1 - R)c_f + Rc_r \end{aligned} \quad (17)$$

因为 $\bar{\tau} = \bar{\sigma} \cdot \text{tg}\phi + c$, 所以现场抗剪强度指标为

$$\left. \begin{aligned} \text{tg}\phi &= (1 - R)\text{tg}\phi_f + R\text{tg}\phi_r, \\ c &= (1 - R)c_f + Rc_r \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

上式即为斯肯普顿用以计算 ϕ 及 c 的公式。

斯肯普顿计算 R 的方法是在土条间 $\angle E_i = 0$ 的条件下, 以一个滑动断面采用圆弧滑动面或直线滑动面, 按静力平衡条件计算滑坡时的 $\bar{\tau}$ 及 $\bar{\sigma}$, 应用 $\text{tg}\phi_f$ 、 c_f 、 $\text{tg}\phi_r$ 及 c_r , 计算 τ_f 及 τ_r , 按式(14)定出 R 。用这种方法得出的 R , 再按式(18)定出的 c 及 ϕ , 都是在没有考虑土条间作用力得出的强度指标。设图 4 中的 τ_f 线为峰值强度曲线, τ_r 线为残余强度曲线, 两线交于 O''

点。在 $\angle E_i = 0$ 的条件下, A 点座标代表反算得出的 $\bar{\sigma}$ 及 $\bar{\tau}$ 值。过 A 、 O'' 两点的直线为 S 线。以 $\tau_f = \bar{\sigma} \cdot \text{tg} \phi_f + c_f$ 及 $\tau_r = \bar{\sigma} \cdot \text{tg} \phi_r + c_r$ 代入式(14), 整理后得

$$\bar{\tau} - [(1 - R) \cdot \text{tg} \phi_f + R \cdot \text{tg} \phi_r] \bar{\sigma} = c_f - R(c_f - c_r)$$

上式是残余系数为 R 时 S 线的方程式。 S 线的斜率 $\text{tg} \phi = \frac{\bar{\tau}}{\bar{\sigma}} = (1 - R) \cdot \text{tg} \phi_f + R \cdot \text{tg} \phi_r$, 纵截距 $\bar{\tau} = c_f - R(c_f - c_r)$ 。斜率和截距的值与式(18)相同, 故 S 线即为按斯肯普顿方法所确定的现场抗剪强度曲线。要作出 S 线, 困难是 τ_f 线不易准确的确定。

2. 用超余系数 T 确定的方法

由于超余系数 T 与不易确定的 τ_f 无关, 只与比较稳定的 τ_r 有关, 故确定现场抗剪强度的另一方法是利用 T 来确定强度指标。因为

$$T = \frac{\bar{\tau}}{\tau_r} = \frac{\bar{\sigma} \cdot \text{tg} \phi + c}{\bar{\sigma} \cdot \text{tg} \phi_r + c_r},$$

有则

$$T(\bar{\sigma} \cdot \text{tg} \phi_r + c_r) = \bar{\sigma} \cdot \text{tg} \phi + c$$

由此得出

$$\left. \begin{aligned} \text{tg} \phi &= T \cdot \text{tg} \phi_r, \\ c &= T \cdot c_r \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

上式表明, 现场抗剪强度指标取决于超余系数 T 及残余强度指标 ϕ_r 及 c_r (本文简称 TR 法)。应用本法可很简捷地确定强度指标。用上述斯肯普顿计算滑坡的数据, 按式(16), 超余系数 $T = \frac{\bar{\tau}}{\tau_r} = \frac{380}{800 \text{tg} 16^\circ} = 1.65$ 。按式(19), 平均抗剪强度指标 $c = 0$, $\text{tg} \phi = 1.65 \times \text{tg} 16^\circ = 0.473$, $\phi = 25^\circ$ 。

T 的计算可有二种方法, 即: $\angle E_i = 0$ 及 $\angle E_i \neq 0$ 。前者只需一个滑动断面, 求出的 T 用以确定现场抗剪强度指标; 后者则需二个滑动断面, 按简化毕晓普方法, 先反算出 c 和 ϕ , 再算 $\bar{\tau}$ 和 $\bar{\sigma}$, 求出的 T 用以了解抗剪强度的超余程度。但都可用这些在工程实践中积累起来的 T 值, 确定别处裂隙条件相似的裂隙土层的强度指标。图4中 O' 为 τ_r 线与 $\bar{\sigma}$ 轴的交点, AO' 线为 L 线。以 $\tau_r = \bar{\sigma} \cdot \text{tg} \phi_r + c_r$ 代入式(16), 得 L 线的斜率 $\text{tg} \phi = T \cdot \text{tg} \phi_r$, 纵截距 $c = T \cdot c_r$, 故图中的 L 线即为本文建议的现场抗剪强度曲线。

(三) TR 法与斯肯普顿法比较

图4中 τ_f 线与 τ_r 线的交点 O'' 若处在 $\bar{\sigma}$ 轴上方。对于 ϕ 值, L 线小于 S 线, 而且 L 线的 ϕ 为 $\phi_r \leq \phi < \phi_f$ 。对于 c 值, L 线大于 S 线。随着 $\bar{\tau}$ 的增大, A 点向上移动, L 线的 c 值从 c_r 增大直至大于 c_f 。

当 τ_f 与 τ_r 成正比, O' 与 O'' 重合于 $\bar{\sigma}$ 轴上, 见图5。按 TR 法及斯肯普顿法得出的强度指标相同。

当交点 O'' 在 $\bar{\sigma}$ 轴下方, 见图6。对于 ϕ 值, L 线大于 S 线。对于 c 值, L 线小于 S 线, 而且 L 线的 c 为 $c_r \leq c < c_f$ 。 A 点上移, L 线的 ϕ 从 ϕ_r 增大直至大于 ϕ_f 。

当 $\bar{\tau}$ 较大时, L 线虽然在图4出现了 $c > c_f$, 在图6中出现 $\phi > \phi_f$, 但现场抗剪强度仍在 τ_f 及 τ_r 之间。出现上述现象的原因是, 确定 A 点坐标 $\bar{\sigma}$ 及 $\bar{\tau}$ 二值的计算方法并非完善, τ_f 及 τ_r 线也并非真实地反映土的二种强度特性。不论 A 点偏高, τ_f 或 τ_r 线偏低, 都可能出现上述现象, 而这并不意味着按式(19)所确定的 c 及 ϕ 真能超越 c_f 及 ϕ_f 。正是为了避免这种现象的出现, 所以 TR 法摒弃了不可靠的 τ_f 线。而在斯肯普顿方法中, 若不可靠地定出 A 点, τ_f 或 τ_r 线, 则 A 点不一定总在 τ_f 及 τ_r 线之间。结果, 得出不合理的 R 值, 从而得出的强度或低于 τ_r 或高于 τ_f 线。斯肯普顿^[6]在杰克菲尔德(Jackfield)滑坡研究中, 得出 $R = 1.12$, 就是由于 τ_r 线高于土的真实残余强度或 A 点偏低所致。

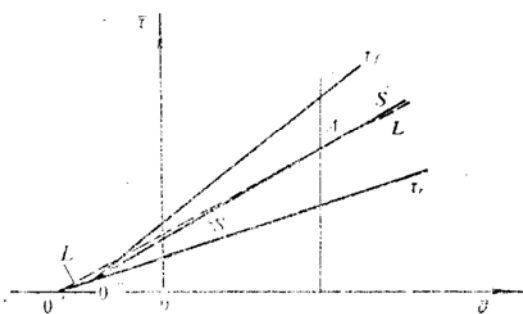


图4

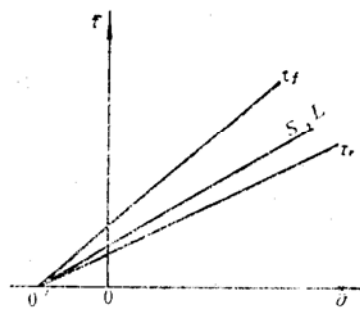


图5

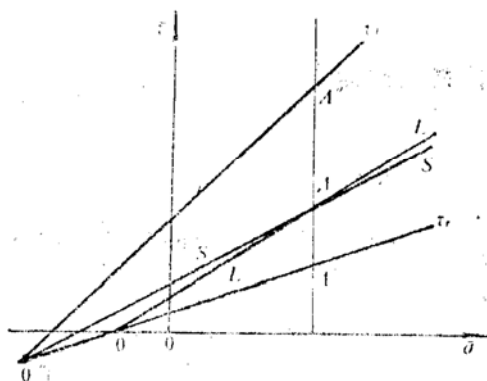


图6

五、算 例

现以发生在渠道上的滑坡为例。滑坡的主轴断面 I-I, 附近另一断面 II-II 以及土层条件分别见图 7(a)、(b)。

第 I 层为第四纪上更新世冲积物(Q_3), 红棕或灰褐色的粘土。结构致密, 厚约 7~8 m, 裂隙发育, 纵横交错。有的裂隙面光滑, 其中夹着白色以蒙脱石为主的次生充填物。本层是发生滑坡的土层。

第 II 层为中更新世泥砾石层(Q_2), 棕黄色粘土夹杂少量由数毫米至 20~30 mm 大小不等的砾石, 土质也很坚硬。细小裂隙也很发育, 厚约 2~3 m, 产状接近水平。滑坡沿着 Q_3 与 Q_2 层的接触面出口。

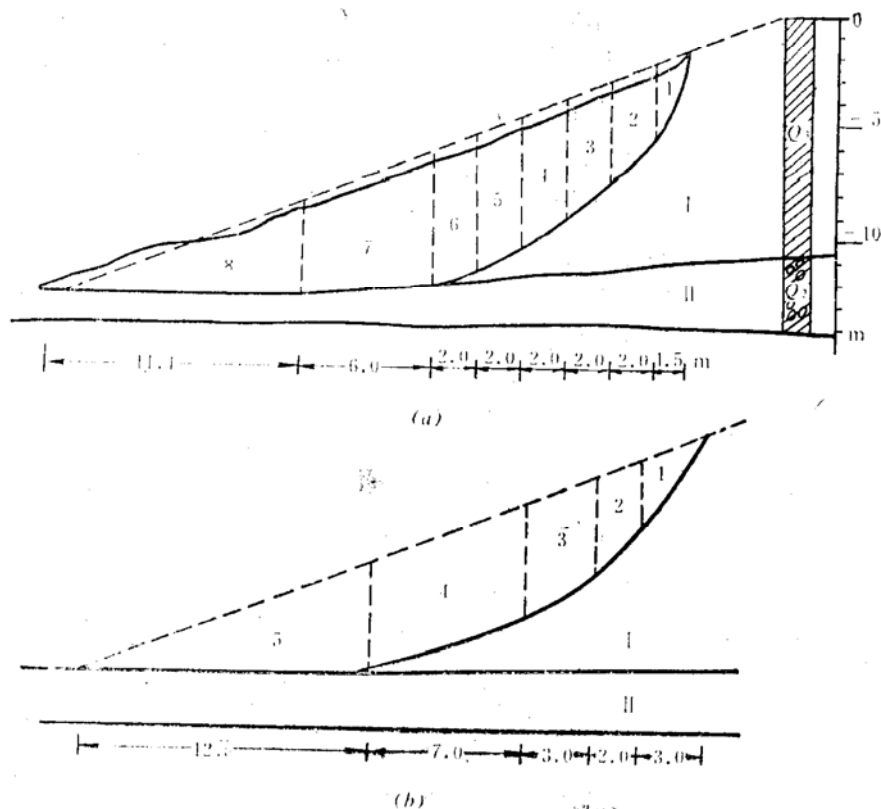


图 7

(一)用反算法(BC法)确定强度指标

1. 土条间 $\Delta E_i \neq 0$

滑坡是在无水平作用力及无渗流作用下发生的, 即 $Q_i = U_i = 0$ 。土层平均容重 $\gamma = 18.23 \text{ kN/m}^3$ 。按式(13)对主轴断面 I-I 及附面断面 II-II 列表(计算表略, 下同)计算, 得出下列二个方程式:

$$\begin{aligned} & \frac{12.82c + 351.15f}{1 + 2.75f} + \frac{4.84c + 326.34f}{1 + 1.19f} + \frac{3.40c + 297.53f}{1 + 0.80f} \\ & + \frac{2.66c + 264.21f}{1 + 0.58f} + \frac{2.42c + 258.03f}{1 + 0.47f} + \frac{2.26c + 247.16f}{1 + 0.36f} \\ & + \frac{6.06c + 552.33f}{1 + 0.087f} + 11.4c + 415.62f = 760.97 \end{aligned} \quad (1')$$

$$\begin{aligned} & \frac{9.12c + 249.31f}{1 + 1.43f} + \frac{3.40c + 223.05f}{1 + 0.84f} + \frac{4.00c + 193.75f}{1 + 0.58f} \\ & + \frac{7.91c + 692.17f}{1 + 0.36f} + 12.5c + 524.10f = 595.45 \end{aligned} \quad (2')$$

(1')及(2')的图解, 见图 8, 得 $f = 0.175$, $\phi = 10^\circ$, $c = 8.43 \text{ kPa}$ 。

以 c , ϕ 值及 $F = 1$ 代入式(9)及(15), 计算断面 I 及 II 的 $\bar{\sigma}_I$ 及 $\bar{\sigma}_{II}$, 取平均值 $\bar{\sigma}$, 以 $\bar{\tau} = \bar{\sigma} \cdot \tan \phi + c$ 计算 $\bar{\tau}$, 得 $\bar{\sigma} = 52.63 \text{ kPa}$, $\bar{\tau} = 17.64 \text{ kPa}$ 。

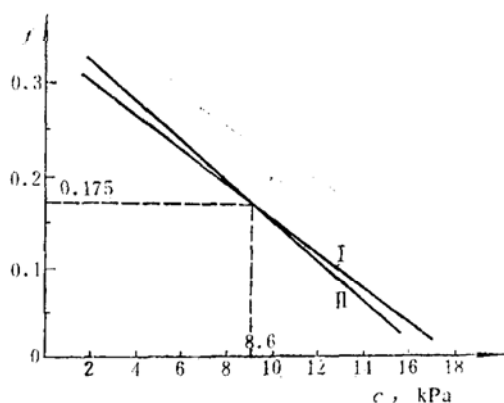


图 8

2. 土条间 $\Delta E_i = 0$

取 $F = 1$ ，按式(1)对断面 I-I 及 II-II 列表计算，得下列二方程式：

$$1766.06f + 34.5c = 566.24 \quad (3')$$

$$1464.32f + 31.3c = 486.96 \quad (4')$$

联立解得 $f = 0.194$ ， $\phi = 11^\circ$ ， $c = 6.47 \text{ kPa}$

(二) 用超余系数结合残余强度法(TR法)确定强度指标

1. $\Delta E_i = 0$

(1) 确定 $\bar{\sigma}$ 及 $\bar{\tau}$

用主轴断面 I-I，按式(6)、(8)及(15)列表计算，得 $\bar{\sigma} = 51.16 \text{ kPa}$ ， $\bar{\tau} = 16.37 \text{ kPa}$ 。

(2) 确定超余系数 T

由试验得出 $\phi_r = 7^\circ$ ， $c_r = 2.94 \text{ kPa}$

按式(16)得 $T = \frac{16.37}{51.16 \tan 7^\circ + 2.94} = 1.775$ 。而 $\Delta E_i \neq 0$ 的 $T = \frac{17.64}{52.63 \tan 7^\circ + 2.94} = 1.876$ 。

(3) 确定抗剪强度指标 ϕ 及 c

按式(19)得 $\tan \phi = T \cdot \tan \phi_r = 1.775 \times \tan 7^\circ = 0.218$ ， $\phi = 12.3^\circ$ ； $c = T \cdot c_r = 1.775 \times 2.94 = 5.19 \text{ kPa}$ 。

2. 按工程实践中积累的 T 计算

按式(19)计算，即得强度指标。

计算结果列于表1，以资比较。

表 1

强度指标计算结果比较表

确定方法	计算条件	$\tan \phi$ (ϕ°)	c (kPa)	$\bar{\sigma}$ (kPa)	$\bar{\tau}$ (kPa)	T	备 注
反 算 法	$\Delta E_i \neq 0$	0.175 (10°)	8.43	52.63	17.64	1.876	用双断面
(BC法)	$\Delta E_i = 0$	0.194 (11°)	6.47				
超余系数法 (TR法)	$\Delta E_i = 0$	0.218 (12.3°)	5.19	51.16	16.37	1.775	用单断面 $\phi_r = 7^\circ$ ， $c_r = 2.94$

由表可知, BC 法中计算条件不同, 强度指标互有增减, ϕ 与 c 分别相差10%及23%。在 BC 法与 TR 法中, 计算条件相同时, 指标也互有增减, ϕ 与 c 分别相差12%及20%, 但指标绝对值的差别很小, 基本上是一致的。对于 T 值, 两种方法计算的结果很接近。

六、结 语

由于裂隙粘土的复杂性及不均匀性, 难以选取代表裂隙土层的土样, 而裂隙土样的室内试验强度也不能代表实际现场抗剪强度。所以, 较为合理可靠的方法是利用滑坡资料, 根据滑动面形态, 直接或间接地确定现场抗剪强度。问题的基本点可归纳为

1. 确定强度指标的方法

可用反算法(BC 法), 也可用超余系数结合残余强度的方法(TR 法)。

2. 反算的方法

采用简化的毕晓普条分法。在二个滑坡断面之间, 联立解出强度指标。本法特点是考虑作用于土条间的推力, 并适用于任何形状的滑动面, 计算的方法并不繁复。

3. 超余系数的方法

本法中关键的问题是超余系数及残余强度取值的可靠性。超余系数可根据一个滑动断面计算得出, 或根据工程实践经验的积累。残余强度虽有经验公式可采用, 但可靠性较差, 应通过取样直接测试。

4. 滑动面形态

这也是 BC 法及 TR 法中的关键问题。应通过仔细勘察, 取得能反映真实情况的滑动面形态。不真实的滑动面, 将会得出虚假的强度指标。

5. 方法的选择

两种方法所得的强度指标值甚为接近, 但 TR 法较 BC 法简便。这两种方法的实践资料很少, 有待于进一步积累经验。

参 考 文 献

- [1] Lo, K. Y., The Operational Strength of Fissured Clays, *Geotechnique*, Vol. XX, No. 1, 1970.
- [2] 潘家铮, 建筑物的抗滑稳定和滑坡分析, 水利出版社, 1980年。
- [3] 马骥, 滑坡推力计算中强度指标的反算, 第三届土力学及基础工程学术会议论文选集, 建筑工业出版社, 1981年。
- [4] 陈愈炯等, 土的接触面的抗剪强度, 第三届土力学及基础工程学术会议论文选集, 建筑工业出版社, 1981年。
- [5] Skempton, A. W., 粘土斜坡的长期稳定性, 水利水运科技情报, 南京水利科学研究所, 1973年, 增刊6。
- [6] 李妥德、张颖钧, 国内外滑坡土残余强度的研究现状, 滑坡文集, 第二册, 铁道出版社, 1979年。