

DOI :10.3876/j.issn.1000-1980.2011.05.008

圆弧滑动法中总应力法和有效应力法适用性辨析

沈 扬^{1,2},张朋举^{1,2},闫 俊^{1,2}

(1.河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室,江苏 南京 210098;

2.河海大学岩土工程科学研究所,江苏 南京 210098)

摘要:针对地下水条件下圆弧滑动法中总应力法和有效应力法 2 种计算方法的假定,指出总应力法是从土条整体极限平衡角度分析的直观方法,但仅考虑了滑弧面上的水压力,在不考虑土条侧向作用力的瑞典条分法中使得安全系数计算值显著降低,需采用修正的总应力法公式,而有效应力法是以浮力形式综合考虑土条各侧面(含滑动面)上水压力的隐性方法,虽不完全符合瑞典条分法不考虑土条侧向作用力的假设,但能较总应力法更便捷和准确地得到安全系数,且在此基础上用流网法分析渗流力对土坡稳定影响更为合理.而在考虑条间力的毕肖普法中,考虑土坡顶面水压力抗滑力矩的总应力法和考虑土条浮力的有效应力法在数值计算上完全等价,静水条件下有效应力法计算较为便捷,而有渗流作用时,则是总应力法更加方便.

关键词:圆弧滑动法;总应力法;有效应力法;瑞典条分法;毕肖普法;水压力;浮力

中图分类号:TU432

文献标志码:A

文章编号:1000-1980(2011)05-0517-06

圆弧滑动法是最常用的边坡稳定极限分析方法,因其方法简单,通过极限平衡法就能直接得出安全系数,且在确定强度指标及选取合适的安全系数方面积累了不少经验,由此被工程界广泛选用^[1-2]. 而其在考虑静水和渗流条件时有总应力法和有效应力法 2 种计算方法.

图 1 为 1 个静水条件下的土坡及切取的全部浸没于水中的单一土条 i 受力情况分析.总应力法下,土坡安全系数表达式为

$$F_s = \frac{\sum \{c'_i l_i + [W_i \cos \alpha_i - (u_{i\text{down}} l_i - u_{i\text{up}} l'_i)] \tan \varphi'_i\}}{\sum W_i \sin \alpha_i - M_{\text{top}}/R} \quad (1)$$

式中: c'_i, φ'_i ——土条 i 的有效黏聚力和内摩擦角; α_i, l_i, l'_i, W_i ——土条 i 的底部坡角、底部长度、顶部长度、土条质量(水面以下取饱和质量); $u_{i\text{up}}, u_{i\text{down}}$ ——土条 i 的上、下面中点处的孔隙水压力绝对值(即不存在超孔隙水压力与静孔隙水压力之分,下文所涉及渗流情况亦同); M_{top} ——浸没在水中部分各土条的坡面孔隙水压力对 O 点形成的合力矩.

大多数文献出现的公式一般没有上部水压力 $u_{i\text{up}}$ 和 M_{top} ,但浸没在水中的土条上表面所受的水压力显然应该考虑.式(1)可以清楚地表明,只要土条完全浸没在水中,安全系数不会随土条所处深度的不同而变化.

而有效应力法较多采用式(2)表示.式(2)的特点是将土体的饱和重力密度改为有效重力密度,其本质反映了土体所受浮力对土坡稳定的影响^[3].也有一些教材或文献中提出采用土条底部水压沿竖直方向的分力来表示浮力影响(式(3)).从力学构成上说,静水时式(2)

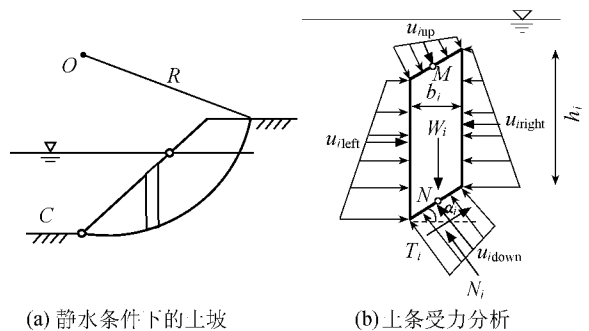


图 1 静水条件下的土坡及土条受力情况示意图

Fig. 1 Sketch of earth slope subjected to hydrostatic pressure and forces acting on slice

与式(3)等价,但在渗流条件下式(2)不能与式(3)通用.

$$F_s = \frac{\sum [c'_i l_i + (\gamma_{\text{isat}} - \gamma_w) b_i h_i \cos \alpha_i \tan \varphi'_i]}{\sum (\gamma_{\text{isat}} - \gamma_w) b_i h_i \sin \alpha_i} = \frac{\sum [c'_i l_i + \gamma'_i b_i h_i \cos \alpha_i \tan \varphi'_i]}{\sum \gamma'_i b_i h_i \sin \alpha_i} \quad (2)$$

$$F_s = \frac{\sum \{ \gamma'_i l_i + [W_i - (u_{\text{idown}} - u_{\text{iup}}) b_i] \cos \alpha_i \tan \varphi'_i \}}{\sum [W_i - (u_{\text{idown}} - u_{\text{iup}}) b_i] \sin \alpha_i} \quad (3)$$

式中: $\gamma_{\text{isat}}, \gamma'_i, \gamma_w$ ——土条 i 的饱和重力密度、有效重力密度、水的重力密度; b_i, h_i ——土条 i 的宽度、高度.

工程计算普遍发现,总应力法公式在瑞典条分法中有更小的安全系数,使结果偏于保守,但很少有著作对此进行深入说明.而目前一些规范在使用瑞典条分法时,更倾向于采用本文所说的总应力法,如文献[4-5](在此需要说明,文献[5]或其他规范中稳定计算方法中所谓根据不同工况采用的有效应力法与总应力法与本文的概念不同,规范中是以强度指标为依据划分的,而本文是根据受力分析对象划分的,即以整个土条为研究对象就是总应力法,以土条中的土粒为对象就是有效应力法,所以目前各规范中真正用到瑞典条分有效应力法的很少).为了辨析这一基本而又重要的物理概念,为工程实际服务,本文以力学中最基本的静力平衡法入手来说明总应力法和有效应力法这2种方法的适用性问题.

1 瑞典条分法中的有效应力法与总应力法之比较

1.1 总应力法求解静水问题力学平衡剖析

图1(a)是一部分浸没在水中的土坡,从浸没在水中的土坡切出一土条,若不考虑土条侧面的土压力,而仅考虑左、右侧水压力,则土条各面上所受静水压力及滑动面上有效压力 N_i 和抗滑力 T_i 如图1(b)所示,由以滑弧圆心取矩的力矩平衡,得到土条安全系数为

$$F_s = \frac{\sum \{ \gamma'_i l_i + [W_i \cos \alpha_i - (u_{\text{idown}} l_i - u_{\text{iup}} l'_i) + (u_{\text{ileft}} - u_{\text{iright}}) h_i \sin \alpha_i] \tan \varphi'_i \}}{\sum W_i \sin \alpha_i - M_{\text{top}}/R} \quad (4)$$

式中: $u_{\text{ileft}}, u_{\text{iright}}$ 为土条左、右侧面 $1/2$ 高度处的孔隙水压力绝对值, $u_{\text{ileft}}, u_{\text{iright}}$ 与 h_i 相乘即为土条左右侧面水压力合力.

对瑞典条分法而言,不考虑条间力(即图1(b)中左右两侧的水压力也不予考虑),故式(4)将简化为式(1)形式.对比式(4)和式(1),无疑 $u_{\text{ileft}} - u_{\text{iright}} > 0$,因此式(1)要比式(4)求得的安全系数小.而如果不考虑坡顶面的 M_{top} ,求得的安全系数更小.上述的推论方法是以整个土条为研究对象的,水压力作用于土条整体,没有区分土条中的水和土颗粒,故称此法为土条分析中的总应力法.

应该说,总应力法符合瑞典条分法的基本假设,在假设的前提下是合理的,且目前应用较广,如文献[4-5].但由于忽略了土条侧面水压力的作用,故式(1)得到的安全系数误差较大.

1.2 有效应力法求解静水问题力学平衡剖析

由图1(b)可见,式(1)较式(4)的差别即为忽略了土条侧面的水压力.而在静水情况下,土条4个面水压力的合力就是土条所受的浮力,此时若用浮力来表述,就可一并计算4个面上的水压力.水压力的合力即浮力的方向向上,大小等于土条体积乘以 γ_w ,如此就得到式(2)表述的安全系数表达式.而根据压力特征,图1(b)所示土条上、下面中点 M, N 处之静水压力差 $u_{\text{idown}} - u_{\text{iup}} = \gamma_w h_i$,因此可将式(2)改写为式(3)的形式,而这样的转化过程表明,式(3)中的孔压并没有真正反映该点孔压作用的方向,只是一个相对数值.由于该法是从土颗粒所受浮力的角度来分析,公式中出现了有效重力密度的表达方式,因此将这种方法称为有效应力分析法.

从式(2)、式(3)可见,竖直向上的浮力不仅会减少法向有效压力,进而减少抗滑摩阻力的发挥,同时它也能投影到滑动面的切向上,作为一个抗滑力,使得整体的滑动力下降.因此不能认为浮力对土条滑动总是起不利作用.

所以,比较静水条件下的总应力法和有效应力法,有效应力法考虑了土条4面水压力的作用,所得安全系数更贴近实际.而以总应力法得出的安全系数由于只考虑土条上、下面的水压力,更偏离实际值,且较之有效应力法得到更小的安全系数.

在图1(b)的土条分析中,左、右侧水平向水压力合力向左(且不是无黏性土,即使在各土条叠加中也不

会抵消),其映射在滑动面上的法向分力方向向下,增加了有效压力进而提高了摩阻力,而合力的切向分力又与滑动方向相反,因而增加了抗滑力.相应可推得,土条侧向水压力的合力是增加抗滑安全系数的,因此未考虑侧向水压力的总应力法表达式(1)计算的安全系数明显低于有效应力法表达式(2)计算的安全系数.

由以上分析可见,在静水条件下,采用有效应力法进行瑞典条分法的土坡稳定分析更为合理,也可对总应力法进行修正,直接表示为式(4)的形式,但在静水时,仍没有有效应力法运用便捷、直接.

1.3 渗流问题中 2 种方法的进一步探讨

总应力法中,按原始瑞典条分法的假设,不考虑土条的侧向作用力,则采用式(1),渗流力只能从土条上、下面的水压力与静水情况下压力的改变来反映,侧向水压力的改变依然无法考虑.因此在有渗流时,虽然侧向水压力合力向左,式(1)却无法体现其对土坡稳定的不利作用,从而高估安全系数计算值.现有的堤防工程设计规范^[4]所采用的方法就存在这一问题,且其对土条所受静水压力的简化也不尽如人意.

用总应力法的修正式(4)虽能考虑侧向水压力的影响,但由于渗流时土条侧向水压力沿深度不一定线性分布,且土条长度 h_i 较长,故无法如静水条件下取土条侧中点位置的压强来计算水压力合力,而需借助流网,计算流网各网格的水压力,从而叠加出侧向的水压力(该法类似有效应力法的流网法,但有效应力法的流网法是以颗粒为对象,通过流网计算渗流力,而总应力法是以土体为对象,借助流网来计算土条侧边水压力).因此式(4)应改写为式(5)的形式:

$$F_s = \frac{\sum \{c'_i l_i + [W_i \cos \alpha_i - (U_{i\text{down}} - U_{i\text{up}}) + (U_{i\text{left}} - U_{i\text{right}}) \sin \alpha_i] \tan \varphi'_i\}}{\sum W_i \sin \alpha_i - M_{\text{top}}/R}$$

(5)

式中: $U_{i\text{up}}, U_{i\text{down}}, U_{i\text{left}}, U_{i\text{right}}$ 为土条上、下、左、右各面根据流网计算得到的水压力合力,如图 2(b)所示.

如果选用有效应力法,土颗粒在渗流情况下将受到渗流力和浮力 2 个力的作用,故可采用有效重力密度,将浮力部分先行分离,而所受渗流力部分,则可由流网法计算.因此可在式(2)的基础上将此时的安全系数修正为式(6)形式

$$F_s = \frac{\sum \{c'_i l_i + b_i (\gamma_i h_{1i} + \gamma'_i h_{2i}) \cos \alpha_i \tan \varphi'_i\}}{\sum [b_i (\gamma_i h_{1i} + \gamma'_i h_{2i}) \sin \alpha_i + \tau_{ji} l_i]}$$

(6)

式中: $\tau_{ji} l_i$ 为将通过流网测定的渗流力再折算到滑动面上作为等效增加滑动力的表述式.

但对有效应力法计算渗流问题,笔者认为采用基于式(3)这样的压差变式要慎重.这是因为在渗流问题中, $u_{i\text{up}}$ 和 $u_{i\text{down}}$ 的水头压差不仅是水位高低原因造成的,而且是渗流引起的,如果采用这个压差,则将在含有浮力因素以外,又计入渗流的影响,而流网法已经单独考虑了渗流力,两者叠加考虑就会出现渗流力影响的重复计入,从而造成安全系数计算偏小,且难以估计偏差程度.

1.4 全局理解水对黏性土坡稳定的不利作用

一些工程人员总认为水对土坡稳定是不利的,笔者以有效应力法求解渗流条件下的土坡安全系数为例,定性地分析水对土坡稳定的不利因素,以及是否存在有利的一面,特别就本文提到浮力对于土坡稳定的贡献问题予以说明.无疑渗流力是水带给土坡不稳定性的最大因素,而强度参数在水中的软化^[6]是水增加土坡不稳定性的次要因素.而水本身只产生浮力和渗流力,因此浮力对土坡是否也是一个不稳定因素,是需要关注的重点.

关于这一问题,笔者认为首先与土坡构形有关.对于无黏性土土坡,一般假设其为平面滑动^[7],分析时,都认为静水条件下,若不考虑强度指标的减弱,饱水与干土坡的安全系数一致,即浮力对土坡安全性没有影响.而对于黏性土坡,由于一般假设为圆弧滑动^[8-9],则每一土条与水平面的倾角不同,因此相邻土条水压力沿土条滑面方向的作用力不能抵消,故计算安全系数时每一土条中的水压力都必须分别考虑.在此前提下,从静水条件下的式(2)来看,由于浮力存在,在法向上的确减少了有效压应力,从而减少了可以发挥的摩擦

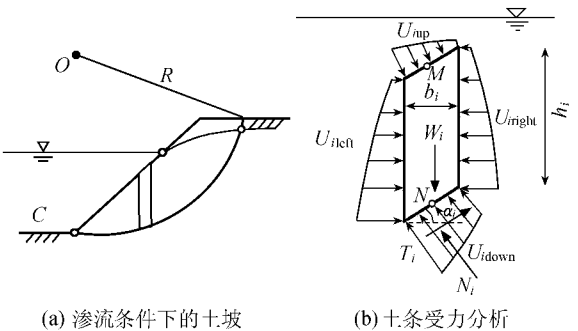


图 2 渗流条件下的土坡及土条受力情况示意图
Fig. 2 Sketch of earth slope subjected to steady seepage and forces acting on slice

力,但同时又由于浮力在切向方向的分力与滑动方向相反,因此也增加了切向的抗滑力.因此从浮力角度,不能绝对认为水位增加就降低了安全系数.

进一步从浸水时的土条安全系数表达式分析,若考虑最一般条件,即土条部分浸没,则将单一土条的安全系数表达式(2)改写为

$$F_s = \frac{\sum [c'_i l_i + b_i (\gamma_i h_{1i} + \gamma'_i h_{2i}) \cos \alpha_i \tan \varphi'_i]}{\sum b_i (\gamma_i h_{1i} + \gamma'_i h_{2i}) \sin \alpha_i} = \frac{\sum \left(\frac{c'_i l_i}{\gamma_i h_{1i} + \gamma'_i h_{2i}} + b_i \cos \alpha_i \tan \varphi'_i \right)}{\sum b_i \sin \alpha_i} \quad (7)$$

式中: h_{1i} ——土条未浸没部分高度; h_{2i} ——土条浸没部分高度.

由于土体天然重力密度大于有效重力密度,浸水后导致重力密度下降, $\frac{c'_i l_i}{\gamma_i h_{1i} + \gamma'_i h_{2i}}$ 数值提高,安全系数反而相应增加.可见单从浮力角度而言,静水条件下,安全系数并非绝对下降,关键看浸水引起黏聚力 c'_i 和内摩擦角 φ'_i 下降是否比重力密度下降程度更明显.从式(7)可见,对无黏性土, $c'_i = 0$,则安全系数退化为 $F_s = \tan \varphi'_i / \tan \theta_i$,表明无黏性土无论滑面形式如何,安全系数都与静水条件下的水位无关(假设静水对摩擦系数没有影响),若滑面不是圆弧而是平面,则安全系数更退化为一个只与摩擦系数和坡角有关的常数了.

1.5 瑞典条分法下土坡稳定分析的简单总结

通过本文分析可知,在瑞典条分法中,可采用有效应力法和总应力法 2 种方法,但从误差程度以及便捷角度分析,静水条件下建议采用有效应力法的计算式(2)或式(3),而在渗流条件下建议采用修正的总应力法式(5)或有效应力法式(6).需说明的是,有效应力法虽然反映了条间水压力的作用,但只是一种综合的隐性表达,也未能考虑条间土压力的影响,故仍广义归属于瑞典条分法范畴.

2 毕肖普法中的有效应力法与总应力法之比较

2.1 毕肖普法较之瑞典条分法的优势分析

一般认为毕肖普法较之瑞典条分法在稳定性分析时更具优势,毕肖普法考虑了水平条间力,但其考虑问题的方式更为巧妙.

图 3 表示 2 个相邻的土条,其中 X_{i+1} 与 E_{i+1} 为切向与法向条间力, α_i 与 α_{i+1} 为 2 个土条滑面与水平面的夹角.由于滑动面为曲面,相邻 2 个土条滑面与水平面的夹角并非常数,造成土条接触面上一对相互作用力.当该对相互作用力分到各自滑动面上时,对滑动面所起的作用分力不同,进而在使用安全系数整体叠加分析求和时,相邻土条的侧向力在累积时不能抵消^[10].如仍沿袭瑞典条分法的解题思路,从力的平衡角度直接分析问题,势必增加包括竖向、水平条间力以及力的作用点在内的 6 个未知数,难以建立足够的方程予以求解.

而毕肖普法较好地克服了这一难题.其基本思想为,既然力平衡法中相邻土条分力不能抵消,则改为力矩平衡思路,整个滑动土体对滑弧圆心求力矩平衡,此时相邻土条的一对侧向力对滑弧圆心的力矩正好可以抵消.因此,所谓的“考虑条间力”,实际操作中因为土条间的两两叠加而消去了水平力,只剩下条间的竖向力.故对毕肖普法的严格描述应该是合理隐藏了水平向作用力,计算或忽略(对简化毕肖普法而言)竖向作用力的圆弧条分法.同时由于土条间作用力矩的两两抵消,又可隐去条间力,土条上只留有重力、滑动面上的抗滑摩阻力以及土条顶面上的水压力构建力矩平衡,其中,抗滑摩阻力需用滑面有效压力 N' 求解.而 N' 是通过土条在竖直方向上建立平衡方程计算得到(表示为竖向条间力,重力,土条上、下面水压力向上合力的函数),从而再次避开水平力(也可以建立水平平衡方程,但要考虑水平力,而对水平力的忽略显然没有竖向力忽略的误差范围小).因此毕肖普法安全系数公式为

$$F_s = \frac{\sum \frac{1}{m_i} \{ c'_i b_i + [W_{isat} - (u_{idown} - u_{iup}) b_i + \Delta X_i] \tan \varphi'_i \}}{\sum W_{isat} \sin \alpha_i - M_{top}/R} \quad (8)$$

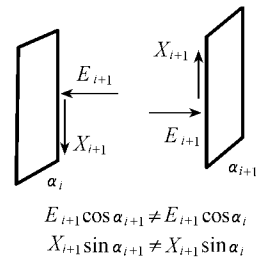


图 3 毕肖普法中相邻土条受力情况示意图

Fig. 3 Sketch of forces on interface between two neighboring slices in Bishop's method

其中

$$m_i = \cos\alpha_i + \frac{\tan\varphi'_i}{F_s} \sin\alpha_i \quad \Delta X_i = X_{i+1} - X_i$$

式中, X_{i+1}, X_i 为土条 i 两侧所受切向力.

2.2 毕肖普法中静水条件下总应力和有效应力法求解安全系数差异分析

式(8)出现的 $(u_{i\text{down}} - u_{i\text{up}}) b_i$ 与式(3)中 $(u_{i\text{down}} - u_{i\text{up}}) b_i$ 含义不同. 如前所述, N 的求解是通过竖向力平衡, 毕肖普法中 $(u_{i\text{down}} - u_{i\text{up}}) b_i$ 就是垂直作用滑面的孔隙水压力在竖直方向上的分力, 并非瑞典条分法中土条 4 个面所受水压力的合力(浮力). 因此式(8)所表示的就是总应力法的土坡稳定分析得到的安全系数. 同时, 对比瑞典条分法中的式(1), 式(8)并未忽略土条的水平向作用力(包括水压力和土压力, 只是通过力矩平衡两两抵消), 因此求得的安全系数更加准确. 而从有效应力法来看, 水对土条作用力的合力即浮力必然向上, 也能建立与 N_i 在竖直方向上的平衡, 而此时合力矩的平衡将包括土条饱和重力、土条所受浮力以及滑动面上抗滑力三者产生力矩的合力矩, 再根据 $N_i = N_i = (W_{i\text{sat}} + \Delta X_i - F_{\text{浮}} - c'_i l_i \sin\alpha_i) / m_i$ 以及 $F_{\text{浮}} = \gamma_w h_i b_i$, 可得到有效应力法下的毕肖普法安全系数表达式为

$$F_s = \frac{\sum \frac{1}{m_i} [c'_i b_i + (W_{i\text{sat}} - F_{\text{浮}} + \Delta X_i) \tan\varphi'_i]}{\sum (W_{i\text{sat}} - F_{\text{浮}}) \sin\alpha_i} = \frac{\sum \frac{1}{m_i} \{ c'_i b_i + [(\gamma_{w\text{sat}} - \gamma_w) h_i b_i + \Delta X_i] \tan\varphi'_i \}}{\sum (\gamma_{w\text{sat}} - \gamma_w) h_i b_i \sin\alpha_i} = \frac{\sum \frac{1}{m_i} [c'_i b_i + (\gamma'_i h_i b_i + \Delta X_i) \tan\varphi'_i]}{\sum \gamma'_i h_i b_i \sin\alpha_i} \tag{9}$$

而本文所述, $u_{i\text{down}} - u_{i\text{up}} = \gamma_{iw} h_i$. 式(8)和式(9)比较, 前者巧妙利用了滑面上孔压作用力过滑弧圆心而不产生力矩的思路, 但保留了土条顶面水压力所产生的力矩, 而后者则根据浮力的思想, 综合考虑土条各面上的水压力合力作用, 虽每一土条水压力合力均产生一个力矩, 但计算并不繁琐, 也不用单独测算土条顶面上的水压力, 因此 2 种分析方法出发思路不同, 但计算结果上应该是等价的, 且显然有效应力法求解更为便利.

而一般的文献中, 没有考虑 M_{top} , 提出的公式为

$$F_s = \frac{\sum \frac{1}{m_i} \{ c'_i b_i + [W_{i\text{sat}} - (u_{i\text{down}} - u_{i\text{up}}) b_i + \Delta X_i] \tan\varphi'_i \}}{\sum W_{i\text{sat}} \sin\alpha_i} \tag{10}$$

无疑较之式(8), 式(10)计算的安全系数明显偏小, 也不会和有效应力法的安全系数式(9)等价.

2.3 毕肖普法中渗流条件下总应力和有效应力法求解应用分析

在渗流情况下, 总应力法仍沿用式(8)不变, 且由于该式并不需要水平力不存在的假设前提, 因此式(8)在渗流条件下亦是精确解. 而对有效应力法而言, 若将浮力和渗流力分别考虑, 需在式(9)利用土体的有效重力密度考虑浮力影响的基础上, 再用流网法计算渗流力. 总应力法和有效应力法计算得到的安全系数应完全一致, 但计算过程总应力法明显便捷. 即任何的滑弧分析法, 只要考虑了条间力, 特别是考虑了条间水平力的情况, 总应力法与有效应力法在计算土坡安全系数值上是基本等价的, 而总应力法在计算便捷程度上反而更胜一筹.

3 结 语

本文通过物理上的严格分析, 明晰了有效应力法和总应力分析法在圆弧滑动法应用中的注意点和缺点. 瑞典条分法中, 2 种应力分析法均可采用. 但从误差程度以及便捷角度分析, 静水条件下建议采用以浮力形式来综合考虑土条各侧面上水压力合力作用的有效应力法公式, 渗流条件下建议采用有效应力法公式或修正的总应力法公式. 而在毕肖普法中, 有效应力法和总应力法在物理意义上完全等价, 但从操作便利性上而言, 静水条件下推荐有效应力法, 渗流条件下则建议采用总应力法.

由于目前国内的行业规范有关土坡稳定圆弧滑动计算方法并不统一, 主要采用不考虑条间作用力的瑞典条分总应力法和考虑条间水平作用力的简化毕肖普法. 其中如港口及航道护岸工程设计与施工规范^[12]、水利水电工程边坡设计规范^[13]采用简化毕肖普法计算稳定系数, 未采用瑞典条分法, 且前者将式(9)中 m_i 中的 F_s 赋值为 1, 从而使安全系数计算变为显式, 而后者完全按照式(9)迭代计算安全系数. 堤防工程设计规范^[4]土坡抗滑稳定计算则只选用瑞典条分法, 而碾压式土石坝设计规范^[5]除了采用瑞典条分法、简化毕肖普

法,还给出了其他计算方法.笔者希望通过本文的分析,将各种分析方法在岩土力学基本概念层面的认识先予以明晰强调,进而为各种规范计算方法的统一以及相关工程安全与经济的设计方法提供有益的借鉴.

致谢 本文成稿过程中得到刘平博士研究生的诸多修改建议,在此特表感谢.

参考文献:

- [1] 孙敏.边坡稳定分析中瑞典条分法的改进[J].吉林大学学报:地球科学版,2007,37(增刊1):225-227.(SUN Min. Modification of Swedish slice method in slope stability analysis[J]. Journal of Jilin University: Earth Science, 2007, 37(Sup1): 225-227. (in Chinese))
- [2] 林丽,郑颖人,孔亮,等.条分法的统一公式及其分析[J].地下空间,2002,22(3):252-255.(LIN Li, ZHENG Ying-ren, KONG Liang, et al. Unified formula for the slice methods and its analysis[J]. Underground Space, 2002, 22(3): 252-255. (in Chinese))
- [3] 毛昶熙,段祥宝,吴良骥.再论渗透力及其应用[J].长江科学院院报,2009,26(增刊1):1-5.(MAO Chang-xi, DUAN Xiang-bao, WU Liang-ji. Discussion again on seepage force and its application[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2009, 26(Sup1): 1-5. (in Chinese))
- [4] GB50286—98 堤防工程设计规范[S].
- [5] SL274—2001 碾压式土石坝设计规范[S].
- [6] 毛昶熙,段祥宝.关于渗流的力及其应用[J].岩土力学,2009,30(6):1569-1574.(MAO Chang-xi, DUAN Xiang-bao. On seepage forces and its application[J]. Rocks and Soil Mechanics, 2009, 30(6): 1569-1574. (in Chinese))
- [7] 郑颖人,唐晓松.库水作用下的边(滑)坡稳定性分析[J].岩土工程学报,2007,29(8):1115-1121.(ZHENG Ying-ren, TANG Xiao-song. Stability analysis of slopes under drawdown condition of reservoirs[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(8): 1115-1121. (in Chinese))
- [8] 卢廷浩.土力学[M].2版.南京:河海大学出版社,2005:235-244.
- [9] 尤明庆.均质土坡的圆弧滑动分析[J].岩土力学,2009,29(8):2025-2032.(YOU Ming-qing. Analysis of homogeneous soil slope slipping in circular arc[J]. Rocks and Soil Mechanics, 2009, 29(8): 2025-2032. (in Chinese))
- [10] BISHOP A W. The use of the slip circle in the stability analysis of slopes[J]. Geotechnique, 1955, 5(1): 7-17.
- [11] 殷宗泽.土工原理[M].南京:河海大学出版社,2007:411-413.
- [12] JTJ300—2000 港口及航道护岸工程设计与施工规范[S].
- [13] SL386—2007 水利水电工程边坡设计规范[S].

Applicability identification of total stress and effective stress methods in circular slide analysis

SHEN Yang^{1,2}, ZHANG Peng-ju^{1,2}, YAN Jun^{1,2}

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Institute of Geotechnical Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Through analysis of assumptions of the total stress method and effective stress method, it is shown that the total stress method is an intuitive method on the basis of soil slice limit equilibrium. The water pressure on the slide surface is taken into account, and the lateral forces of slices are ignored in the Swedish slice method. Therefore, the calculated safety factor decreases significantly, and the formula should be modified. In the effective stress method, the water pressure on each side (including the slide surface) is considered implicitly as buoyancy. Though it does not exactly match the fundamental assumptions of the Swedish slice method, compared with the total stress method, the effective stress method is more precise and convenient for obtaining safety factor, based on which the analysis results of the effect of seepage forces on slope stability is more reasonable with the flow-net method. When it comes to the Bishop's method which considers the lateral forces of slices, the effective stress method and total stress method are totally equivalent in numerical calculation. Nevertheless, the effective stress method is more convenient in the hydrostatic condition, and the total stress method is more convenient in the seepage condition.

Key words: circular slide method; total stress method; effective stress method; Swedish slice method; Bishop's method; water pressure; buoyancy