



瑞典条分法与简化毕肖普法 在海堤抗滑稳定分析中的比较

杨晓松, 高 涛

(山东省交通规划设计院, 山东 济南 250031)

摘要: 海堤作为围海工程的主体, 准确计算和控制海堤的整体抗滑稳定性是整个围海工程顺利完成的关键。针对目前常采用的瑞典条分法与简化毕肖普法整体抗滑稳定计算方法, 考虑孔隙水压力的影响, 从基本公式、基本假定、公式推导、公式简化等方面对瑞典条分法和简化毕肖普法进行了对比并得到了两种方法之间的相互关系。结合福建省沿海软基筑堤典型工程, 分别用这两种计算方法得出稳定系数, 进一步论证了两种方法之间的相互关系。

关键词: 围海工程; 海堤; 整体抗滑稳定性; 瑞典条分法; 简化毕肖普法

中图分类号: TV 16; U 656.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2017)02-0027-06

Comparison of Sweden slice method and simplified Bishop method in seawall stability analysis

YANG Xiao-song, GAO Tao

(Shandong Provincial Communications Planning and Design Institute, Ji'nan 250031, China)

Abstract: A seawall is the main subject of the coastal reclamation, and the accurate calculation and the control of the overall sliding stability of the seawall are the key points of the successful completion of the whole reclamation projects. The Sweden slice method and the simplified Bishop method are two overall anti-sliding stability calculation methods which are commonly used at present. Considering the influence of pore water pressure, these two methods are compared from the aspects of the calculation principle, the basic assumption, the derivation and simplification of formula and so on, and the relationship between two methods is obtained. Then a typical project of soft embankment along the coast of Fujian province is calculated using these two methods, further demonstrating the relationship between the two methods.

Keywords: coastal reclamation; seawall; overall stability against sliding; Sweden slice method; simplified Bishop

我国东南沿海经济发达、人口密集、土地资源非常紧张, 地方多通过围海造地来缓解土地资源紧张的局面。海堤作为围海造地的主体工程, 一般位于浅海滩涂上, 其地质条件较差, 多为软土地基, 软土地基的抗剪强度很低, 要采取有效措施才能保证海堤安全稳定^[1]。因此, 在海堤建

设过程中准确计算和控制海堤的稳定性是整个围海工程能否顺利完建的关键。

海堤工程稳定性主要涉及4个方面^[2]: 地基破坏形式、计算方法、强度指标、安全系数。地基破坏形式不同, 稳定计算的方法也应不同, 当地基较为均匀时, 一般认为破坏面为圆弧或接近

收稿日期: 2016-05-25

作者简介: 杨晓松 (1981—), 男, 硕士, 工程师, 从事码头、围垦、航道、水利工程设计。

于圆弧, 现规范中常用的是瑞典条分法和简化毕肖普法。关于两种方法的应用, 已有许多人做过研究; 郭诚谦等^[3]对土石坝进行稳定分析时, 采用这两种计算方法(瑞典圆弧法与毕肖普简化法), 利用单条、无黏性、无孔隙水压力简化进行了研究并比较两者之间的关系。然而, 通常海堤所处位置受潮位影响大, 且土体含水量大, 具有较大孔隙水压力。对此需要在郭诚谦等的研究方法基础上增加考虑孔隙水压力, 推导新的计算公式, 分析其对两种计算方法的影响, 进而探究这两种计算方法在海堤抗滑稳定之间的相互关系, 为以后工程设计中初步判断海堤工程设计和计算是否合理提供判断依据。

1 基本计算公式

基于瑞典条分法与简化毕肖普法均假设滑动面为圆弧面, 现常用的瑞典条分法和简化毕肖普法计算公式分别为:

$$F_{s\text{瑞}} = \frac{\sum [c'_i l_i + (W_i \cos \alpha_i - u_i l_i) \tan \varphi'_i]}{\sum W_i \sin \alpha_i} \quad (1)$$

$$F_{s\text{简}} = \frac{\sum \frac{1}{m_i} [c'_i l_i \cos \alpha_i + (W_i - u_i l_i \cos \alpha_i) \tan \varphi'_i]}{\sum W_i \sin \alpha_i} \quad (2)$$

式中: c'_i 为有效内聚力; φ'_i 为有效内摩擦角; u_i 为孔隙压力; α_i 为滑弧切线角; σ 为各土条上的法向应力; l_i 为土条 i 的弧长; W_i 为土条自重力; F_s 为抗滑稳定安全系数; m_i 为系数, $m_i = \frac{\tan \varphi'_i \sin \alpha_i}{\cos \alpha_i + \frac{\tan \varphi'_i \sin \alpha_i}{F_{s\text{简}}}}$ 。

2 瑞典条分法与简化毕肖普法对比分析

2.1 相同点

从上一节的基本公式可以看出, 瑞典条分法与简化毕肖普法有很多相似点, 二者计算原理均是假定滑动面为圆弧, 且滑面为连续面; 在公式推导过程中, 均采用极限平衡分析条分法, 假定滑坡体和滑面以下的土条均为不变形的刚体, 并

且其稳定安全系数以整个滑动面上的平均抗剪强度与平均剪应力之比来定义, 或者以滑动面上的最大抗滑力矩 M_f 与滑动力矩 M 之比来定义。

2.2 不同点

瑞典条分法不考虑土条之间的相互作用力, 不满足每一土条的力及力矩平衡条件, 仅满足整体力矩平衡条件, 计算中运用了土条 i 的法向静力平衡条件、库仑强度理论、整体对滑弧圆心的力矩平衡。

简化的毕肖普法在公式推导过程中使用了竖向力平衡的原理和力矩平衡原理, 但公式推导后, 又忽略竖向力, 这是简化毕肖普法与瑞典条分法最本质的区别。

2.3 增加孔隙水压力后两种方法的简化对比

1) 圆弧单条简化。

将土坡进行等宽条分处理, 设每一土条宽均为 b , 且假定滑弧内土条条数为 1, 即假定整个滑弧为一条土条(图 1), 则:

$$l = \frac{b}{\cos \alpha} \quad (3)$$

$$W = \rho g b h \times 1 \text{ m} \quad (4)$$

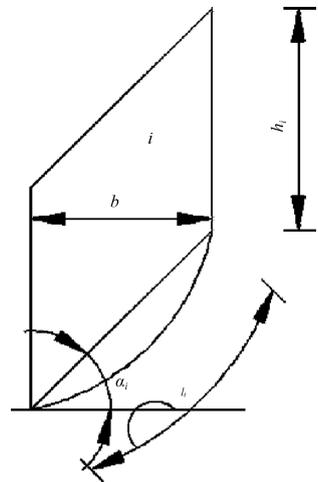


图 1 土条 i 示意图

将式(3)、(4)分别代入式(1)、(2), 得:

$$F_{s\text{瑞}} = \frac{c + (\rho g h \cos^2 \alpha - u) \tan \varphi'}{\rho g h \sin \alpha \cos \alpha} \quad (5)$$

$$F_{s\text{简}} = \frac{[c'_i + (\rho g h - u) \tan \varphi'] \times \frac{1}{(1 + \tan \varphi \tan \alpha / F_{s\text{简}})}}{\rho g h \sin \alpha \cos \alpha} \quad (6)$$

2) 无黏性简化。

假定滑弧内土体均为无黏性土, 即假定土体内聚力为 0, 则:

$$F_{s\text{端}} = \frac{(\rho gh \cos^2 \alpha - u) \tan \varphi}{\rho gh \sin \alpha \cos \alpha} \quad (7)$$

$$F_{s\text{简}} = \frac{(\rho gh - u) \tan \varphi \times \frac{1}{(1 + \tan \varphi \tan \alpha / F_{s\text{简}})}}{\rho gh \sin \alpha \cos \alpha} \quad (8)$$

3) 孔隙水压力简化。

耿贺松等^[4]对于堤坝边坡稳定计算中孔隙水压力的研究表明: 边坡稳定中某点的孔隙水压力可近似按某点到浸润线的垂直高度计算, 即 $u = \rho_{\text{水}} \cdot gh_{\text{水}}$ (图 2)。

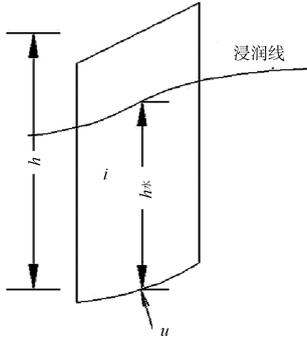


图 2 孔隙水压力计算简图

令 $u = \beta(\rho gh)$, 即令孔隙水压力等于土条自重的 β 倍, 则

$$\beta = \frac{u}{\rho gh} = \frac{\rho_{\text{水}} gh_{\text{水}}}{\rho gh} \quad (9)$$

式(7)、(8)可以简化为:

$$F_{s\text{端}} = \frac{(\cos^2 \alpha - \beta) \tan \varphi}{\sin \alpha \cos \alpha} \quad (10)$$

$$F_{s\text{简}} = \frac{(1 - \beta) \tan \varphi \times \frac{1}{(1 + \tan \varphi \tan \alpha / F_{s\text{简}})}}{\sin \alpha \cos \alpha} \quad (11)$$

4) 商除比较。

式(10)/(11)得:

$$\frac{F_{s\text{端}}}{F_{s\text{简}}} = \frac{(\cos^2 \alpha - \beta)}{(1 - \beta)} \times (1 + \tan \varphi \tan \alpha / F_{s\text{简}}) \quad (12)$$

令 $F_{s\text{端}}/F_{s\text{简}} = \mu$, $\tan \varphi / F_{s\text{简}} = \eta$, 则式(12)可以简化为:

$$\mu = \frac{(\cos^2 \alpha - \beta)}{(1 - \beta)} \times (1 + \eta \tan \alpha) \quad (13)$$

2.4 孔隙水压力对两种算法的差异影响

在得到式(13)后, 可以看出: μ (瑞典条分法计算最小安全系数值与简化毕肖普法计算最小安全系数值之比) 与 α 、 β 、 η 有关, 即与滑弧切线角、孔隙水压力系数以及土体内摩擦角与 $F_{s\text{简}}$ 的比值有关, 因此要比较这两种方法在海堤整体抗滑稳定中的关系, 需要研究 μ 与 α 、 β 、 η 的关系。

1) 孔隙水压力系数 β 。

对于式(9), $\beta = \frac{\rho_{\text{水}} gh_{\text{水}}}{\rho gh}$, 由工程建设经验可知:

① $h_{\text{水}} \leq h \Rightarrow \beta \leq \frac{\rho_{\text{水}}}{\rho}$; 地基土及筑堤堤身材料的密度通常均满足 $\rho > 1.5 \text{ t/m}^3$, 则有 $\rho_{\text{水}} = 1.0 \text{ t/m}^3 \Rightarrow \beta \leq 10/15 \leq 0.66$;

② $\mu \geq 0 \Rightarrow 0 \leq \beta \leq 0.66$, 因此 β 上限可定为 0.66。

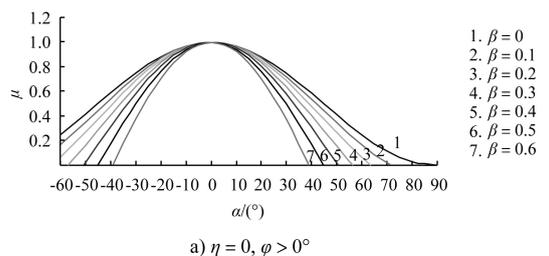
2) 土体内摩擦角与 $F_{s\text{简}}$ 比值 η 。

根据工程中已预先预制成的 $m_i = f(\alpha_i, \frac{\tan \varphi_i}{F})$

图表^[5]可知: $\eta = \frac{\tan \varphi}{F}$ 可以取值 0、0.2、0.4、0.6、0.8、1.0。由规范可知海堤整体稳定的必要条件是 最小安全系数 F 不小于 1, 则 $\tan \varphi = \eta F \geq \eta$ 。因此可以得出 $\eta = 0$ 时, 土体内摩擦角 $\varphi > 0$ 。同理依次可推出 $\eta = 0.2、0.4、0.6、0.8、1.0$ 时, $\varphi > 11.3^\circ、21.8^\circ、30.9^\circ、38.7^\circ、45^\circ$ 。

3) 安全系数比 μ 与滑弧水平角 α 关系。

结合上述 β 和 η 的控制范围, 根据式(13)绘制 μ 与 α 关系曲线, 在考虑孔隙水压力情况下, 借助理正程序研究瑞典条分法安全系数与简化毕肖普法安全系数的变化关系, 得到的曲线见图 3。



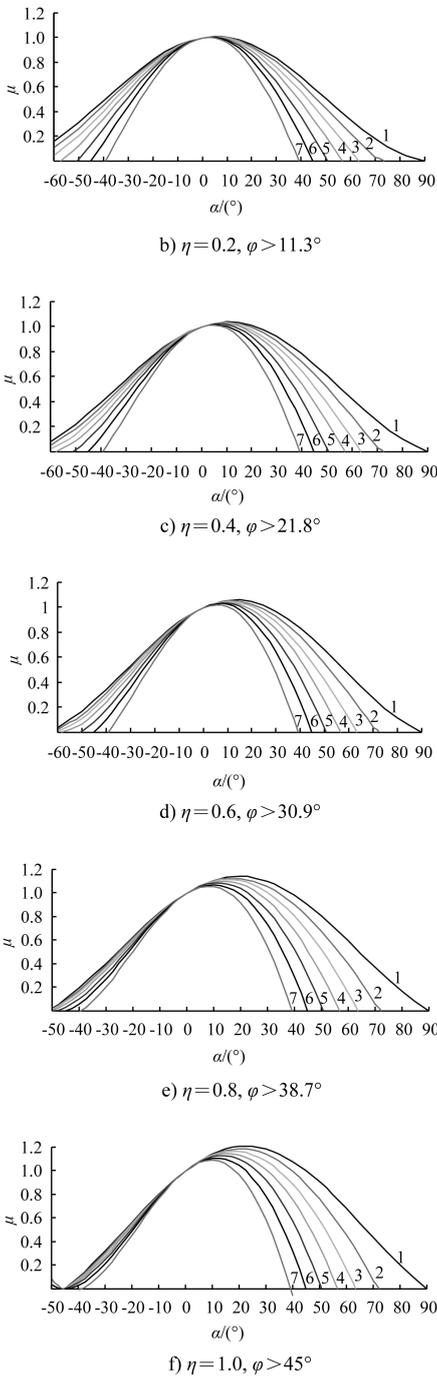


图3 $\mu-\alpha$ 曲线

对图3进行分析研究可知：

①在同一孔隙水压力下，当 $\eta < 0.4 (0^\circ < \varphi < 21.8^\circ)$ 时， $\mu < 1$ ，即 $F_{s\text{瑞}} < F_{s\text{简}}$ ，因此从工程设计角度采用瑞典条分法较为稳妥；当 $\eta > 0.4 (\varphi > 21.8^\circ)$ 、 $10^\circ \leq \alpha \leq 45^\circ$ 时， $\mu > 1$ ，即 $F_{s\text{瑞}} > F_{s\text{简}}$ ，当 $\alpha \leq 10^\circ$ 或 $\alpha \geq 45^\circ$ 时， $\mu < 1$ ，即 $F_{s\text{瑞}} < F_{s\text{简}}$ ，因此在 $\eta > 0.4 (\varphi > 21.8^\circ)$

情况下建议采用简化毕肖普法，但应采用瑞典条分法进行复核。

② μ 上限 $\mu_{\text{max}} \leq 1.2$ 即瑞典条分法计算值最大只能为简化毕肖普法计算值的1.2倍，且当 $\eta = 1 (\varphi > 45^\circ)$ 时， μ 才能取到上限1.2。

③随着 β （孔隙水压力）的增大，安全系数比 μ 与滑弧水平角 α 曲线的斜率也增大； α 一定时， β 越大则 μ 越小，即随着孔隙水压力的增大，瑞典条分法安全系数与简化毕肖普法安全系数比值 μ 呈减小趋势。

3 典型海堤工程断面整体稳定性分析

在上一节中，从基本理论计算公式入手，经过简化和假设对瑞典条分法和简化毕肖普法进行了对比分析，得出增加孔隙水压力后各种情况下 $F_{s\text{简}}$ 与 $F_{s\text{瑞}}$ 的关系，为了更深入准确地研究两者之间关系，本节结合典型的工程实例分析，以福建莆田后海围垦续建工程^[6]为例，分别采用瑞典条分法与简化毕肖普法对海堤断面进行整体稳定计算，分析研究实际工程海堤断面稳定性特点。

3.1 工程概况

后海围垦工程位于莆田县东南端的兴化湾内，主堤全长1477m，该项目为续建项目，续建前期海堤已建近10年时间；海堤结构断面形式为斜坡式（图4），堤身采用土石混合结构，向外设置抛石棱体和镇压层，内坡采用淤泥质黏土，其物理力学指标见表1；工程区地层自上而下主要分别为沙质填土、淤泥质土、黏土、亚黏土、轻亚黏土，强风化花岗岩（表2）。

表1 堤身填料物理力学指标

填料	湿密度/ (t/m ³)	饱和密度/ (t/m ³)	密度/ (t/m ³)	粘聚力/ kPa	内摩擦角/ (°)
抛石	1.50	2.00	1.00	0	38
原土体	1.61	1.96	0.96	6	32
海泥掺砂	1.60	1.70	0.70	11	16

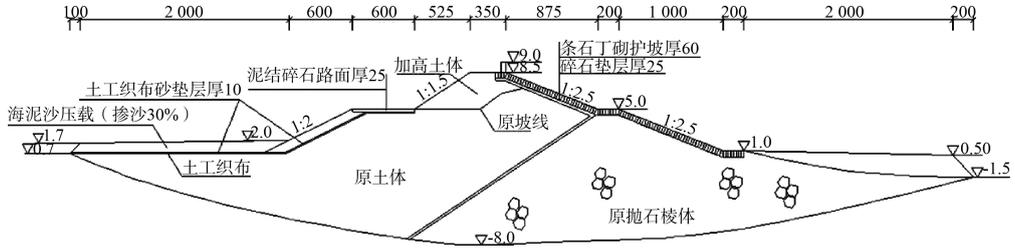


图 4 后海围垦续建工程海堤断面 (高程: m; 尺寸: cm)

表 2 地基土壤物理学指标

岩土层	含水量 w/%	天然密度 $\rho/(g/cm^3)$	饱和密度 $\rho/(g/cm^3)$	孔隙比 e	压缩系数 $a_{0.1-0}/MPa^{-1}$	固结系数 $c_v/(10^{-3} cm^2/s)$	直接快剪		有效快剪	
							粘聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(^\circ)$	粘聚力 c'/kPa	内摩擦角 $\varphi'/(^\circ)$
滩涂淤泥 0~11 m	50	1.74	1.79	1.2	0.08	4.20	11.27	5.3	19.6	28.8
亚黏土 11~21 m	30	1.92	1.98	0.8	0.02	8.12	6.00	6.0		

3.2 水位组合

孔隙水压力^[7]的大小与工程所处的水位有很大关系, 因此要研究孔隙水压力对安全系数的影响, 则需要考虑本工程的两种极端水位工况, 即低水位和高水位。本工程的两种工况分别为: 1) 工况 1 (低水位)。外水位 0.0 m, 内水位 2.5 m。2) 工况 2 (高水位)。外水位 2.8 m, 内水位 5.2 m。

3.3 安全系数计算结果

为分析瑞典圆弧法与简化毕肖普法计算的安

全系数的影响规律, 选取不同的圆心角对应的瑞典条分法和简化毕肖普法安全系数计算结果, 每个工况选择 4 种圆弧圆心角。计算出安全系数后, 为进一步探究瑞典条分法和简化毕肖普法之间相互关系, 本文引入瑞典条分法较简化毕肖普法的减幅系数 δ , 其基本表达式为:

$$\delta = \frac{(F_{s\text{简}} - F_{s\text{瑞}})}{F_{s\text{瑞}}} \times 100\% \quad (14)$$

得出的安全系数结果和 δ 值见表 3。

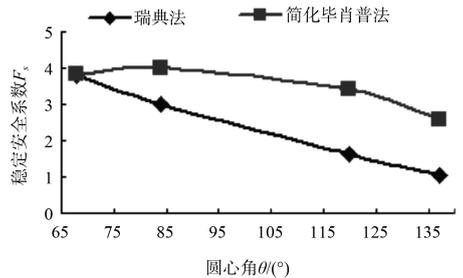
表 3 不同工况下安全系数及瑞典条分法较简化毕肖普法的减幅

工况	68°			84°			120°			137°		
	$F_{s\text{瑞}}$	$F_{s\text{简}}$	$\delta/\%$									
1	3.80	3.82	0.5	2.99	4.01	34.1	1.64	3.43	109	1.03	2.58	150
2	8.75	8.87	1.3	5.23	7.21	38.4	1.76	3.86	119	1.11	2.84	155

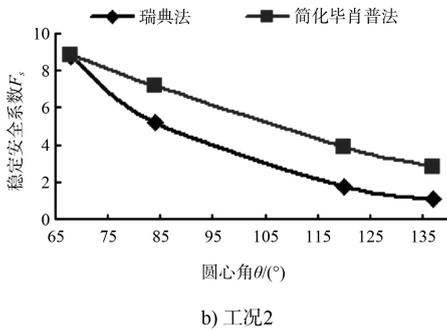
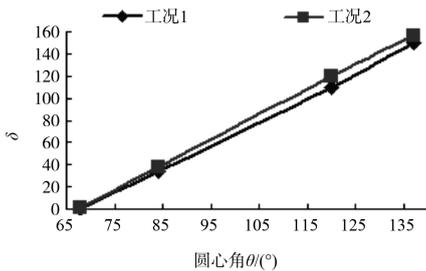
注: 表中的计算结果采用了如下计算步骤^[8]: 1) 用瑞典条分法计算出海堤的最小安全系数时的滑弧圆心、半径及圆心角, 并且根据此滑弧计算出简化毕肖普法的稳定安全系数; 2) 圆心不变, 对表格中的不同圆心角分别用瑞典条分法和简化毕肖普法计算此新滑弧的安全稳定系数。

3.4 安全系数与孔隙水压力、圆弧圆心角之间的关系

为更清楚直观看出瑞典条分法和简化毕肖普法计算的安全系数与孔隙水压力、圆弧圆心角之间的关系, 利用表 3 的结果进行曲线拟合, 分别得到 $F_s-\theta$ (安全系数与圆弧圆心角的关系) 曲线 (图 5)、 $\delta-\theta$ (瑞典条分法较简化毕肖普法的减幅与圆弧圆心角的关系) 曲线 (图 6)。



a) 工况 1

图5 $F_s - \theta$ 曲线图6 $\delta - \theta$ 曲线

1) 在表3中,从工况1到工况2,简化毕肖普法的安全系数比瑞典条分法的安全系数增加得多,这说明随着孔隙水压力的增大,简化毕肖普法安全系数增幅大于瑞典条分法。这与前面孔隙水压力增大、两者安全系数之比减少是相吻合的。

2) 在相同孔隙水压力下,随着圆弧圆心角 θ 的增大,瑞典条分法和简化毕肖普法的稳定安全系数呈减小趋势,由此推出:两种计算方法的最小稳定安全系数位于 θ 较大处,因此可知,海堤的最危险圆弧滑动面^[9]是大圆弧滑动面,其滑动圆弧的圆心角较大。

3) 大多数情况下,简化毕肖普法计算结果大于瑞典条分法计算结果,即 $F_{s,简} > F_{s,瑞}$;随着圆弧圆心角 θ 的增大,瑞典条分法计算值比简化毕肖普法计算值减小得明显,两者计算结果的差距也增大,因此在设计中采用瑞典条分法更为妥当,这与平时设计中采用瑞典条分法计算最不利滑弧是一致的。

4) 随着圆弧圆心角 θ 的增大, δ 增大趋势明显,即瑞典条分法计算结果较简化毕肖普法计算结果的减幅大。

4 结论

1) 多数情况下简化毕肖普法的安全系数计算

结果比瑞典条分法的计算结果大,只有当土体内摩擦角 $\varphi > 21.8^\circ$ 且 $10^\circ \leq \alpha \leq 45^\circ$ 时, $F_{s,简} < F_{s,瑞}$,因此在工程设计中建议采用瑞典条分法计算海堤整体稳定;当土体内摩擦角 $\varphi > 21.8^\circ$ 时应先采用瑞典条分法计算整体稳定,然后采用简化毕肖普法进行整体稳定复核算。

2) 同一滑弧时简化毕肖普法安全系数 $F_{s,简}$ 可以是 $F_{s,瑞}$ 的很多倍;但 $F_{s,简}$ 不会超过 $F_{s,瑞}$ 的1.2倍,且当土体内摩擦角 $\varphi > 45^\circ$ 时,才能达到上限1.2。

3) 随着孔隙水压力 μ 的增大(即 β 增大),瑞典条分法的安全系数较简化毕肖普法安全系数之比减小,且简化毕肖普法安全系数 $F_{s,简}$ 增加幅度大于瑞典条分法的安全系数 $F_{s,瑞}$;因此在这种情况下,设计中建议采用瑞典条分法。

4) 海堤最危险滑动面是大圆弧面,其圆弧圆心角较大。随着圆弧圆心角的增大,瑞典条分法计算值减小比简化毕肖普法计算值减小明显,由于 $F_{s,简}$ 本身就大于 $F_{s,瑞}$,因此从设计角度考虑,当圆弧圆心角较大时,采用瑞典条分法更为稳妥。

参考文献:

- [1] 严恺.中国海岸工程[M].南京:河海大学出版社,1992:34-97.
- [2] 廖树德.海堤稳定计算中存在的若干问题[J].浙江水利科技,1981(2):1-6.
- [3] 郭诚谦,宋敬街.论土石坝稳定分析的瑞典圆弧法与毕肖普法之间差异[J].水利水电技术,2007,38(9):26-27.
- [4] 耿贺松,耿敬,霍洪元.堤坝边坡稳定计算中的孔隙水压力计算[J].黑龙江水利科技,2003(4):1-5.
- [5] 福建省水利水电厅.福建省围垦工程设计技术规程[S].福州:福建省水利水电厅,1992:109-120.
- [6] 福建省水电厅水利建设技术服务中心.福建省莆田县后海围垦续建工程初步设计报告[R].福州:福建省水电厅水利建设技术服务中心,1990:20-30.
- [7] 胡其志,程明生.考虑孔隙水压力的土质边坡稳定性分析[J].长沙大学学报,2010,24(2):44-46.
- [8] 胡辉,姚磊华,董梅.瑞典圆弧法和毕肖普法评价边坡稳定性的比较[J].路基工程,2007(6):110-112.
- [9] 黄朝焯,方咏来,袁文喜.深淤泥基础海堤断面结构与滑动稳定关系初探[J].长江科学院院报,2013(2):62-66.