

三维边坡稳定性分析的 严格方法

郑 宏

三峡库区地质灾害教育部重点实验室, 三峡大学
岩土力学与工程国家重点实验室

报告提纲

- 3D分析的意义;
- 3D分析的几种常见方法;
- 现有方法的局限性;
- 滑面法向应力分布的自然形式;
- 总体分析法;
- 算例

3D分析的意义



3D分析的几种常见方法

- 瑞典法: 忽略所有的条间力, 仅满足力平衡条件
- Janby法: 忽略垂直于滑动方向的条块间的作用力, 假定平行于滑动方向的条块间的推力作用点, 满足3个力平衡和一个力矩平衡
- Spencer法: 忽略垂直于滑动方向的条块间的作用力, 假定平行于滑动方向的条块间的推力都相互平行, 满足3个力平衡和一个力矩平衡

现有方法的局限性

- 平衡条件未被全部满足；
- 存在大量的缺乏物理基础的假定；
- 数值特性差；
- 条分化过程过于严格

总体分析法

- 经典的严格条分法都是通过条块的力平衡方程消去条块底部的法向力而将不确定性放在条间力上，所以称其为局部法，这类方法的好处是能充分发挥人们的经验和直觉，但数值特性差：1) 所有方法都是局部收敛的；2) 所有方法都有不收敛的算例。
- Bell于1968年提出了实现严格极限平衡法的另一途径：假定滑面的应力分布。Bell法的优点是无需对条间力做出假定，因平衡条件是针对整个滑体而不是单个条块而列出的，所以称之为整体分析法。

整体分析法—续1

- 整体分析法的优点是其良好的数值特性且易于实现三维严格极限平衡法
- 但30年来整体法一直倍受冷遇，直到杨洪杰等（2001）、朱大勇等(2002)重新发现了这一方法
- Bell, J M. General slope stability analysis [J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 94(SM6): 1253-1270, 1968.
- Yang, H J, Wang J H, Liu Y Q. A new approach for the slope stability analysis. Mechanics Research Communications, 28(6): 653-669, 2001.
- Zhu D Y, Lee C F. Explicit limit equilibrium solution for slope stability. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 26(15):1573-1590, 2002.

滑面法向应力分布的自然形式

$$\sigma(\mathbf{x}) = \sigma_0(\mathbf{x}) + \delta(\mathbf{x})$$

$$\sigma_0 = n_3^2 \bar{\gamma} h$$

滑面法向应力矫正的其它方式

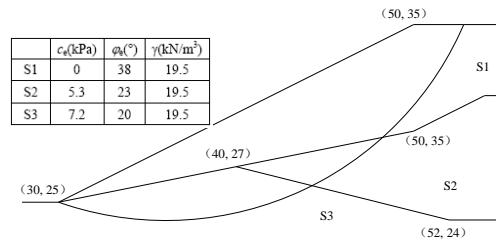
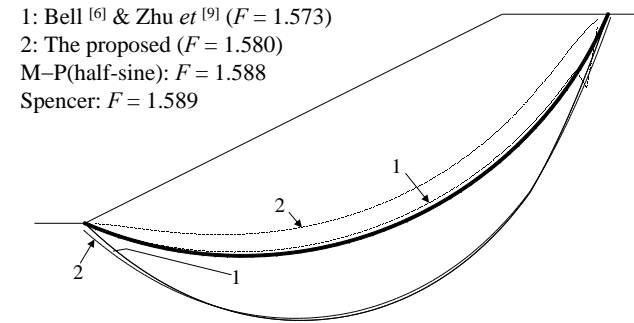
Bell方式 $\sigma = a\sigma_0 + b \sin 2\pi \frac{x - \bar{x}_a}{\bar{x}_b - \bar{x}_a}$

杨洪杰方式 $\sigma = ax^2 + bx + c$

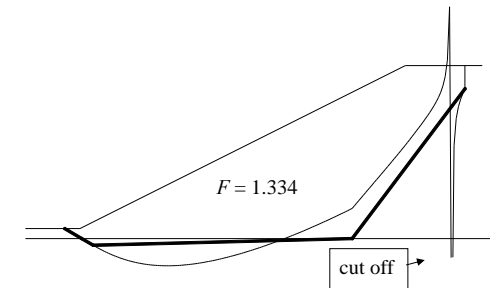
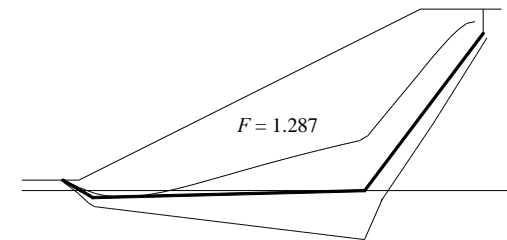
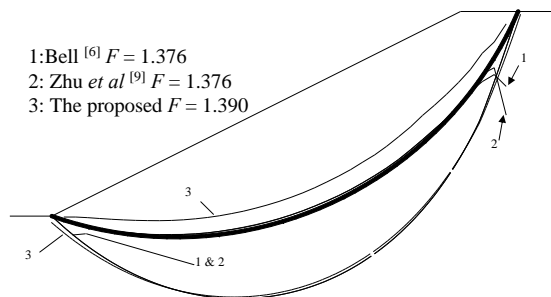
朱大勇方式 $\sigma = \sigma_0 [al_a(x) + bl_b(x)]$

σ_0 是对应与瑞典法的滑面法向应力

几种矫正方式的对比



1: Bell ^[6] $F = 1.376$
 2: Zhu *et al* ^[9] $F = 1.376$
 3: The proposed $F = 1.390$

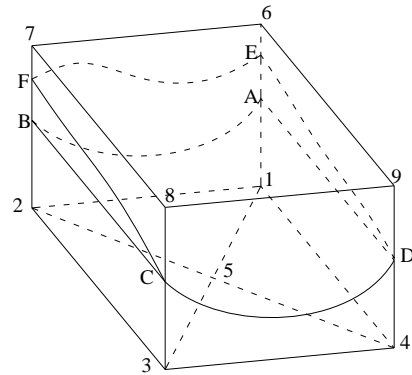


带侧向摩擦边界的滑体的插值盒

$$\delta(\mathbf{x}) = \mathbf{l}^T \boldsymbol{\delta}$$

$$\mathbf{l}^T = (l_1, \dots, l_5)$$

$$\boldsymbol{\delta}^T = (\delta_1, \dots, \delta_5)$$



平衡方程组

$$\left. \begin{aligned} \sum \mathbf{F} = \iint_S d\mathbf{f} + \mathbf{f}_{ext} = 0 \\ \sum \mathbf{m} = \iint_S d\mathbf{m}_c + \mathbf{m}_{ext} = 0 \end{aligned} \right\} \Rightarrow$$

$$\tau = \frac{1}{F} [c_e + f_e(\sigma - u)] \equiv \frac{1}{F} (c_w + f_e \sigma)$$

$$\iint_S (F\mathbf{n}' + f_e \mathbf{s}') \sigma dS + F\mathbf{f}_m + \iint_S c_w \mathbf{s}' dS = 0$$

$$\mathbf{n}' = \begin{pmatrix} \mathbf{n} \\ \Delta \mathbf{x}_c \times \mathbf{n} \end{pmatrix} \quad \mathbf{s}' = \begin{pmatrix} \mathbf{s} \\ \Delta \mathbf{x}_c \times \mathbf{s} \end{pmatrix} \quad \mathbf{f}_m = \begin{pmatrix} \mathbf{f}_{ext} \\ \mathbf{m}_{ext} \end{pmatrix}$$

代 $\sigma(\mathbf{x}) = \sigma_0(\mathbf{x}) + \delta(\mathbf{x}) = \sigma_0(\mathbf{x}) + \mathbf{l}^T \boldsymbol{\delta}$ 入平衡方程组

$$\mathbf{g}(F, \boldsymbol{\delta}) \equiv F\mathbf{P}\boldsymbol{\delta} + \mathbf{Q}\boldsymbol{\delta} + F\mathbf{c} + \mathbf{d} = 0$$

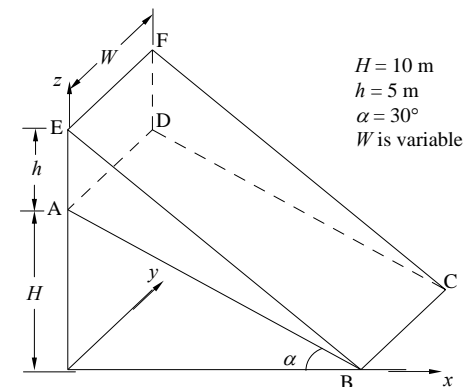
$$\mathbf{P} = \iint_S \mathbf{n}' \mathbf{l}^T dS$$

$$\mathbf{Q} = \iint_S f_e \mathbf{s}' \mathbf{l}^T dS$$

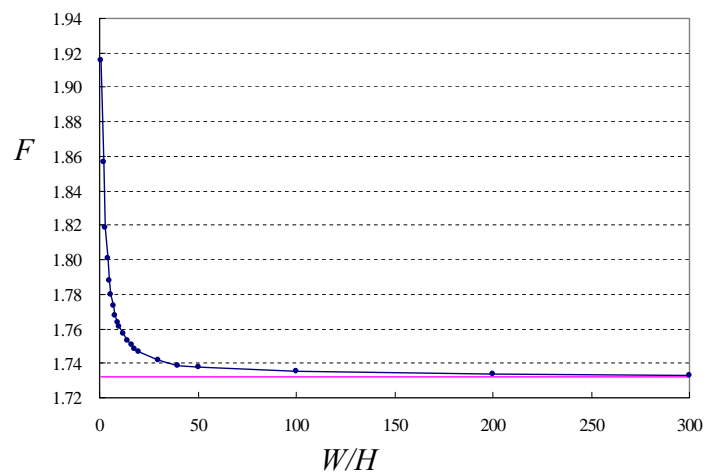
$$\mathbf{c} = \mathbf{f}_m + \iint_S \sigma_0 \mathbf{n}' dS$$

$$\mathbf{d} = \iint_S (c_w + f_e \sigma_0) \mathbf{s}' dS$$

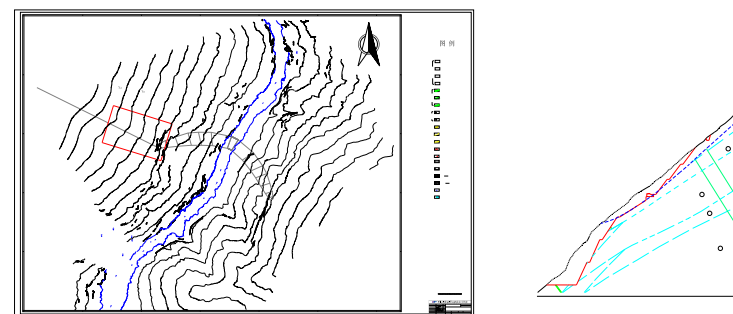
算例1-带侧向摩擦边界的简单算例



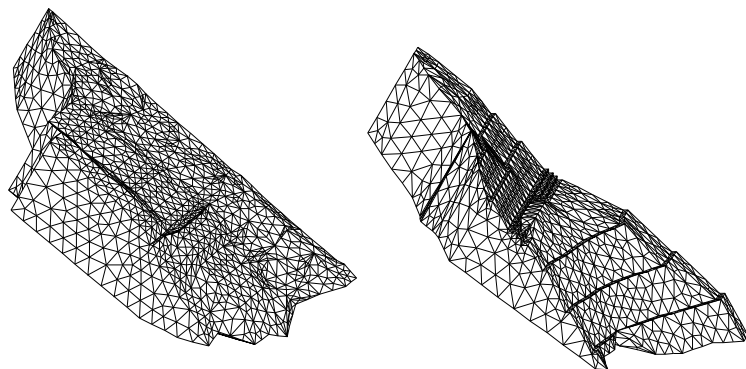
F v.s. W



水电工程之一--大岗山



缆机平台边坡开挖前后的3D模型



计算结果—滑面发现应力分布

