

# 抗剪强度折减系数法在求解 复合土钉支护的稳定系数中的应用

尹 骥 许峻峰

(同济大学地下建筑与结构工程 上海 200092)

**摘 要** 用抗剪强度折减系数法计算复合土钉支护的稳定系数,与传统计算方法相比减少了很多假设,稳定系数的概念更加明确。该方法的计算结果与复合土钉支护实际破坏形态非常吻合,与传统计算方法的结果相差不大。

**关键词** 强度折减法 复合土钉支护 稳定性

## 1 前言

目前,研究复合土钉支护(人工边坡)稳定性的传统方法主要有:极限平衡法,极限分析法,滑移线场法等。这些建立在极限平衡理论基础上的各种稳定性分析方法没有考虑土体内部的应力应变关系;无法分析边坡破坏的发生和发展过程;没有考虑土体与支挡结构(土钉与水泥土搅拦桩)的共同作用及其变形协调;在求安全系数时通常需要假定滑裂面形状为折线、圆弧、对数螺旋线等。而本文中采用的基于有限差分法和强度折减理论的计算稳定性的方法,不但满足力的平衡条件,而且考虑了材料的应力应变关系,使得计算结果更加精确合理。

## 2 抗剪强度折减系数法的理论

### 2.1 抗剪强度折减系数法的概念

抗剪强度折减系数(SSRF: Shear Strength Reduction Factor)定义为:在外荷载保持不变的情况下,边坡内土体所发挥的最大抗剪强度与外荷载在边坡内所产生的实际剪应力之比<sup>[2]</sup>。这里定义的抗剪强度折减系数,与极限平衡分析中所定义的土坡稳定安全系数在本质上是是一致的。

### 2.2 抗剪强度折减系数法的具体内容

所谓抗剪强度折减技术就是将土体的抗剪强度指标  $C$  和  $\phi$ , 用一个折减系数  $F_s$  进行折减,然后用折减后的虚拟抗剪强度指标  $C_F$  和  $\phi_F$ , 取代原来的抗剪强度指标  $C$  和  $\phi$ 。

折减系数  $F_s$  的初始值取得足够小,以保证开始时是一个近乎弹性的问题。然后不断增加  $F_s$  的值,

折减后的抗剪强度指标逐步减小,直到某一个折减抗剪强度下整个土坡发生失稳,那么在发生整体失稳之前的那个折减系数值,即土体的实际抗剪强度指标与发生虚拟破坏时折减度指标的比值,就是这个土坡的稳定安全系数。

### 2.3 抗剪强度折减系数法的优点

结合有限差分法的抗剪强度折减系数法较传统的方法具有如下优点:

- (1)能够对具有复杂地貌、地质的边坡进行计算;
- (2)考虑了土体的本构关系,以及变形对应力的影响;
- (3)能够模拟土坡的滑动过程及其滑移面形状(通常由剪应变增量或者位移增量确定滑移面的形状和位置);
- (4)能够模拟土体与支护结构(超前支护、土钉、面层等)的共同作用;
- (5)求解安全系数时,可以不需要假定滑移面的形状,也无需进行条分。

## 3 计算采用的土体模型

土的莫尔-库仑强度准则是目前岩土工程中应用最为广泛的破坏准则,其表达式为:

收稿日期:2004-07-06

第一作者简介:尹骥,男,同济大学地下建筑与结构工程系硕士研究生,专业方向:基坑工程,地基处理,边坡工程,桩基工程,工程软件开发。

$$\begin{aligned} &= \frac{1}{3} I_1 \sin \vartheta - c \cos \vartheta + \sqrt{J_2} \left( \cos \vartheta + \frac{\sin \vartheta \sin \varphi}{\sqrt{3}} \right) \\ &= 0 \end{aligned} \quad (1)$$

式中  $I_1, J_2$  为应力张量第一不变量和应力偏量第二不变量,  $\vartheta$  为应力罗德角,  $C, \varphi$  为内聚力和内摩擦角。

采用非关联的流动法则,其塑性势函数与屈服函数具有相似的形式,即

$$\begin{aligned} g &= \frac{1}{3} I_1 \sin \vartheta - c \cos \vartheta + \sqrt{J_2} \left( \cos \vartheta + \frac{\sin \vartheta \sin \varphi}{\sqrt{3}} \right) \\ &= 0 \end{aligned} \quad (2)$$

式中  $\vartheta$  为土体的剪胀角,当  $\vartheta = \varphi$  时为相关联的流动法则,  $\vartheta \neq \varphi$  时为非关联的流动法则。

4 计算实例

4.1 计算参数

上海地区土层加权平均值,内聚力  $c = 13 \text{ kPa}$ ,摩擦角  $\varphi = 12.5^\circ$ ;重度  $W = 17.5 \text{ kN/m}^3$ 。搅拌桩强度参数为:内聚力  $c = 100 \text{ kPa}$ ,摩擦角  $\varphi = 20.0^\circ$ ;重度  $W = 20.0 \text{ kN/m}^3$ 。

基坑开挖深度为  $5.0 \text{ m}$ ,搅拌桩宽  $1.0 \text{ m}$ ,长度为  $10.0 \text{ m}$ ,不考虑超载的作用。土钉布置如表 1 所示。

表 1 土钉参数

Table 1 Parameters of soil nails

编号	埋置深度 (m)	土钉长度 (m)	土钉倾角 (Deg)
0	- 1.5	12	10
1	- 2.5	12	10
2	- 3.5	9	10
3	- 4.5	6	20

4.2 强度折减法计算成果

算例采用有限差分法程序 FLAC3D 计算,各个开挖工况的安全系数如表 2 所示。

表 2 各个开挖工况的安全系数

Table 2 Safety factor of each excavation step

编号	开挖深度 (m)	采用土钉	安全系数
0	- 1.5		6.02
1	- 2.5	12	4.52
2	- 3.5	12, 12	3.27
3	- 4.5	12, 12, 9	2.53
4	- 5.0	12, 12, 9, 6	2.27

最后开挖工况破坏时的位移及剪应变增量云彩图 (其余工况结果类似),如图 1、图 2。

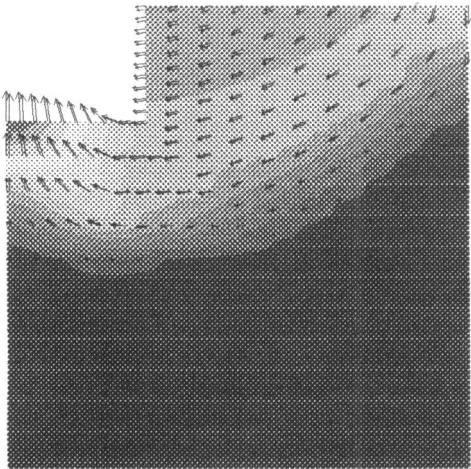


图 1 最后开挖工况位移

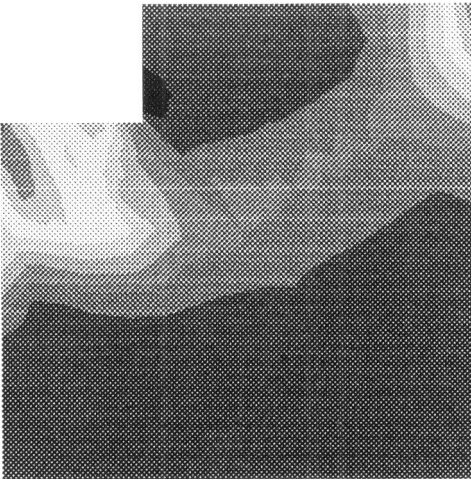


图 2 最后开挖工况剪应变增量

Fig 2 Shear strain increment of the final excavation stage

4.3 强度折减法计算结果小结

由计算结果可得:

- (1)由最后工况的剪应变增量可以看出,由于土钉注浆体的加固作用,土钉长度范围内土体已经成为一个整体,即便是破坏的时候,也是被加固的整体发生滑动;
- (2)滑移面基本上通过搅拌桩底部 (滑移面可以认为是位移突变的区域连通起来形成的面),如图 3;
- (3)破坏时坑底隆起剧烈,开挖面基本上是向基坑外倾斜和平移。

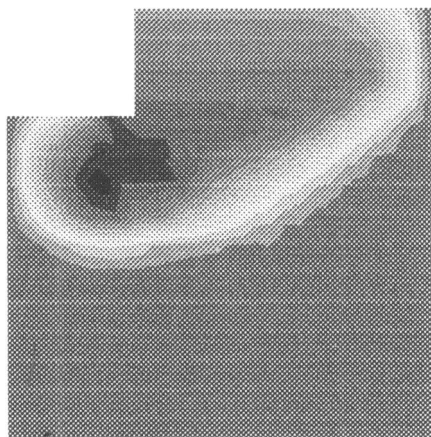


图 3 最后工况的水平位移

Fig 3 Horizontal displacement of the final excavation stage

在实际工况下,位移及剪应变增量与破坏时还是不同的,如图 4~5 所示(开挖至基坑底部)。

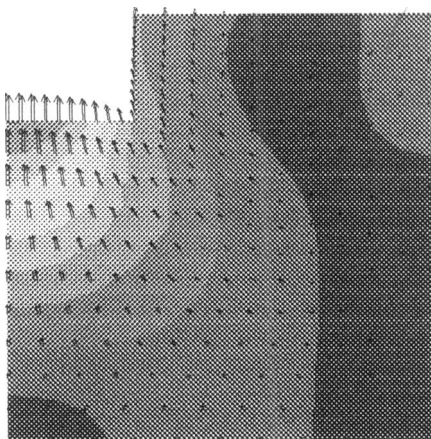


图 4 实际情况的位移

Fig 4 Displacement of the actual conditions

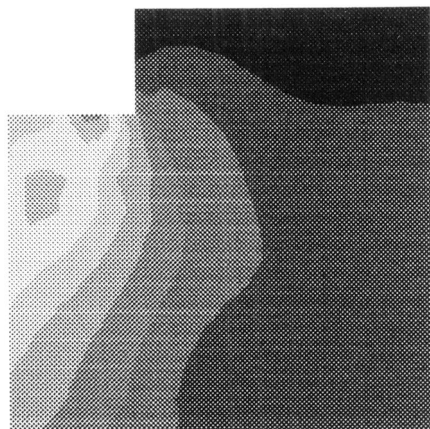


图 5 实际情况的剪应变增量

Fig 5 Shear strain increment of actual conditions

#### 4.4 传统方法与强度折减法计算结果比较

传统方法采用笔者编写的 SoiNail<sup>[3]</sup>程序,计算结果如下:

表 3 各个开挖工况的安全系数

Table 3 Safety factor of each excavation step

编号	开挖深度 (m)	采用土钉	安全系数	与强度折减法 结果差别
0	- 1.5		7.13	18.3%
1	- 2.5	12	4.34	- 3.9%
2	- 3.5	12, 12	3.21	- 1.8%
3	- 4.5	12, 12, 9	2.59	2.4%
4	- 5.0	12, 12, 9, 6, 2	63/1.69	15.8% / - 27.7%

注:工况 4 中,安全系数 2.63 为指定圆弧过坡脚的计算结果;1.69 为自由搜索圆弧的安全系数。

程序搜索的圆弧(滑裂面)形态如图 6 所示。

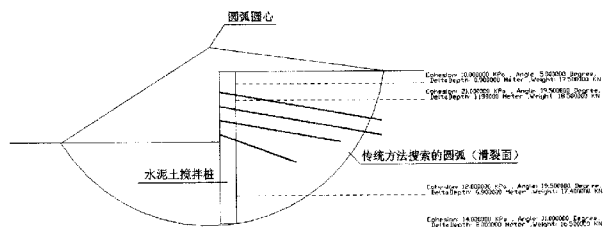


图 6 传统方法搜索的圆弧(滑裂面)

Fig 6 Failure surface searched by the traditional method

由表 3 可见,除了工况 0 与工况 4 的稳定系数与强度折减法计算的稳定系数相差较大外,其余都十分接近。工况 0 的误差是由于土条宽度与开挖深度的比值较大(0.2m/1.5m)而引起的误差;工况 4,按照传统方法,由于土钉注浆体全部在滑移面以内,土钉对基坑的稳定性的作用不计(土钉的锚固长度为 0,抗拔力为 0)。因此安全系数比强度折减法小 27%。如果指定滑移面通过坡脚,由于该滑移面不是实际的滑移面,故计算偏大也是情理之中。如果将工况 4 的两种情况折中一下,则稳定系数为  $(2.63 \pm 1.69) / 2 = 2.16$ ,比强度折减法计算的结果小 4.8%。

#### 5 小结

采用抗剪强度折减系数法计算复合土钉支护的稳定性,相对于传统的方法,减少了很多假设,更加符合实际。特别是解得的破坏时的基坑形态,和实际情况更为接近。而且该方法不是简单地给出一个抽象的安全系数,而且可以求得破坏时的位移场,应力场等。传统的计算方法在计算最后工况时,安全

系数比强度折减法计算结果小 25%左右,但是经过上文建议的方法处理后,还是与强度折减法计算结果相近的。

根据上海地区的工程经验,安全系数 1.4 是一个设计安全与否的临界值。按照强度折减法的结果,安全系数似乎有一点偏大。笔者认为产生这种情况是因为:M - C模型并不能反映上海地区软土高含水量,高灵敏度,高蠕变性的特点。所以建立在大量实践经验基础上的传统的计算方法还是有指导设计的价值的,计算结果不一定偏保守。

#### 参考文献:

- [1] 迟世春,关立军.基于强度折减的拉格朗日差分方法分析土坡稳定性[J].岩土工程学报,2004年1月第26卷第1期
- [2] 赵尚教,郑颖人等.用有限元强度折减法求边坡稳定安全系数[J].岩土工程学报,2002年5月第24卷第3期
- [3] 尹骥,管飞,许俊峰.复合土钉支护稳定性计算方法与边坡裂缝关系的探讨[J].岩土工程界,2004年3月第2期

## The application of the SSRF method to calculate the safety factor of the compound soil nail wall

Yin Ji Xu Junfeng

(Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai, 200092)

**Abstract:** This paper tries to employ the SSRF method to calculate the safety factor of the compound soil nail wall. Compared with the traditional method, SSRF method has reduced a lot of assumption, thus making the concept of safety factor clearer. Result of calculation is identical to the actual failure form of the compound soil nail wall. And the result of calculation of SSRF method and result of the traditional computing technology are pretty much the same.

**Keyword:** Shear Strength Reduction Factor method, compound soil nail wall, safety factor

(上接 24页)

## Environmental effect of pile - driving and excavation of high - rise building on Shanghai soft soil

Chen Yu<sup>1</sup> Tang Jun<sup>2</sup>

(1 Shanghai Institute of Technical Physics, CAS, Shanghai, 200083;

2 Shanghai Shen Yuan Geotechnical Engineering Co. Ltd., Shanghai, 200011)

**Abstract:** In This paper, the hazard assessment for surrounding building and underground facility of excavation and pit supporting structure, as well as the environmental effect because of squeezing surrounding soil while pile - driving, on soft soil. Combining the project example, the cure measures had been put forward.

**Keyword:** soft soil; environmental effect; excavation; pit supporting structure; pile - driving; squeezing effect