

# 基坑安全稳定的广角度综合评判法

胡 强 邵国建 刘 宁  
(河海大学, 江苏南京 210098)

**【摘 要】** 对基坑稳定的评判方法进行了概述, 比较了各方法的优劣性。鉴于各种评判方法有利有弊, 特提出了基坑安全稳定评判的广角度综合评判法, 并以润扬大桥南锚深基坑开挖稳定性研究为例, 讲述了该法在基坑安全评判中的应用, 且应用广角度综合评判法对该基坑进行了稳定评价, 取得了一定的成果。

**【关键词】** 广角度综合评判法; 干扰能量法; 超变形法; 稳定性; 基坑

**【中图分类号】** TU 473.2

## The Stability Judgement Based on Extensive Angle Method in Deep Excavation

Hu Qiang Shao Guojian Liu Ning  
(Hohai university, Jiangsu Nanjing 210098 China)

**【Abstract】** The methods applied in stability of foundation pit are summarized, and then their merits and shortcomings are compared. Based on the interference-energy theory, the extensive angle method is applied in the judgement of the stability of foundation pit. Finally, it is applied in stability judgement of the deep excavation of Run Yang bridge, and the results indicate the foundation pit is stability.

**【Key Words】** extensive angle method; interference-energy method; over-deformation method; stabilization; foundation pit

### 0 引 言

近年来, 基坑开挖过程中, 由于基坑的整体或局部失稳而造成的工程事故屡见不鲜, 基坑的稳定性已经成为整个基坑工程最重要的问题。判定基坑稳定性的方法有很多, 主要有刚体极限平衡法<sup>[1]</sup>, 超载法<sup>[2]</sup>, 变材料参数法<sup>[3]</sup>, 神经网络预测<sup>[4]</sup>等。笔者在文献<sup>[5]</sup>中还提出了超变形法, 但是这些方法都存在各自的缺陷。本文提出基坑的广角度综合评判法, 是采用多种方法对基坑稳定进行评价, 最后对各种方法进行综合, 得出对基坑稳定性的综合评价。同时将另一种稳定评判方法——干扰能量法引入到基坑的稳定性评价中来。干扰能量法是基于能量理论发展起来的一种结构稳定评判方法, 可极方便地进行局部和整体稳定性的分析。干扰能量法目前已成功运用到厚薄板稳定分析<sup>[6]</sup>、三峡船闸高边坡稳定分析<sup>[7]</sup>、地下洞室围岩稳定分析<sup>[8]</sup>等方面, 取得了一定的成果, 但是在基坑安全稳定评判方面, 尚无报道。本文将其应用于润扬大桥的安全稳定评判中, 最后结合其它几种稳定评判方法, 采用广角度综合评判法对润扬大桥南锚深基坑稳定性进行评价。

### 1 基坑安全稳定评判的干扰能量法

#### 1.1 力学原理

根据弹性力学中的能量原理, 可以知道, 判别结构的稳定与否, 可以用该结构能量的二阶变分  $\delta^2 \Pi_p$  来确定, 如下式所示:

$$\left. \begin{aligned} \delta^2 \Pi_p > 0 & \text{ 稳定} \\ \delta^2 \Pi_p = 0 & \text{ 临界状态} \\ \delta^2 \Pi_p < 0 & \text{ 失稳} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

设  $\Pi_p(u_i^0)$  为基坑在原有平衡位置的总势能,  $\Pi_p(u_i^0 + \delta u_i)$  为受到  $\delta u_i$  干扰位移后基坑的总势能, 两者的差值  $\Delta \Pi_p$  则为相应于干扰位移  $\delta u_i$  引起的干扰能量, 有:

$$\begin{aligned} \Delta \Pi_p &= \Pi_p(u_i^0 + \delta u_i) - \Pi_p(u_i^0) \\ \Delta \Pi_p &\approx \delta \Pi_p + \frac{1}{2} \delta^2 \Pi_p \end{aligned} \quad (2)$$

因基坑在扰动前处于平衡状态, 其总势能具有驻值, 满足  $\delta \Pi_p = 0$ , 故式(2)可变为:

$$\Delta \Pi_p \approx \frac{1}{2} \delta^2 \Pi_p \quad (3)$$

由稳定评判准则式(1)及式(3)可知,判断基坑稳定性的关键在于确定干扰能量值  $\Delta \Pi_p$ 。在考虑几何非线性效应的影响下,干扰能量可由下式计算:

$$\Delta \Pi_p = \int_{\Omega} [\sigma_{ij}^0 \Delta e_{ij} + A (\Delta e_{ij}) d\Omega - \int_{\Omega} f_i^0 \Delta u_i d\Omega - \int_{S_p} p_i^0 \Delta u_i ds \quad (4)$$

通过有限元离散处理后,可得式(4)的有限元格式:

$$\Delta \Pi_p = \sum_{e=1}^{N_e} \left[ \iint_{\Omega^e} \left[ \Delta \mathbf{e}^T \boldsymbol{\sigma}^0 + \frac{1}{2} \Delta \boldsymbol{\varepsilon}^T \Delta \boldsymbol{\sigma} \right] d\Omega - (\Delta \boldsymbol{\delta}^e)^T \mathbf{R}_e^0 \right] = \Delta U - \Delta W \quad (5)$$

式中:  $\boldsymbol{\sigma}^0$ ,  $\mathbf{R}_e^0$  分别为原有状态的应力和载荷,  $\Delta \boldsymbol{\delta}^e$ 、 $\Delta \mathbf{e}$ 、 $\Delta \boldsymbol{\varepsilon}$  和  $\Delta \boldsymbol{\sigma}$  分别是干扰位移、应变、小变形应变和应力,  $\Delta U$  为干扰内能,  $\Delta W$  表示外力在干扰位移中所作的功。

由式(4)及式(5)可知,干扰能量  $\Delta \Pi_p$  由干扰位移  $\delta u_i$  直接决定。然而干扰位移  $\delta u_i$  是基坑的可能位移,具有任意性,要判定一个基坑稳定,则必须寻找最不利的干扰位移(使干扰能量  $\Delta \Pi_p$  最小的位移),若与其对应的干扰能量  $\Delta \Pi_p > 0$ ,便可得出基坑稳定的结论。

### 1.2 最不利干扰位移的确定

基坑的可能位移可以表示成振型函数的线性叠加:

$$\Delta \boldsymbol{\delta}^e = (\mathbf{u}^0)^e + \alpha_1 \boldsymbol{\delta}_1^e + \alpha_2 \boldsymbol{\delta}_2^e + \dots + \alpha_n \boldsymbol{\delta}_n^e \quad (6)$$

其中:  $(\mathbf{u}^0)^e$  是单元节点干扰位移的初始设定项,它只需满足协调条件,可取下一级增量载荷引起的增量位移的缩小量。  $\boldsymbol{\delta}_i^e$  是第  $i$  阶振型单元结点的振幅,  $\alpha_i$  是不依赖于坐标的待定常数。

最不利干扰位移是使干扰能量值为最小的干扰位移,它可由下式求得:

$$\frac{\partial \Delta \Pi_p}{\partial \alpha_i} = 0, \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (7)$$

由式(7)可得到一组求解  $\alpha_i$  的线性方程组,求出  $\alpha_i$  后,代回到式(6)便可得到最不利干扰位移,在工程中,前几阶低频振型是主要项,计算实践表明,式(6)一般取前 3~5 阶振型进行计算就已足够了。

### 1.3 基于干扰能量法的基坑稳定安全系数

可以利用能量的观点得到如下的稳定安全系数:

$$K_s = \Delta U / \Delta W \quad (8)$$

式中:  $\Delta U$  及  $\Delta W$  均是标量,可极方便地进行局部和整体稳定性的分析。由式(8)可知,若求出每个单

元的  $\Delta U^e$  及  $\Delta W^e$ , 则可以很方便的求出基坑各个单元的的稳定安全系数;若以整个基坑的  $\Delta U$  及  $\Delta W$  代入式(8),则可求出整个基坑的稳定安全系数。从此可以看出,干扰能量法在基坑稳定评判方面有一定的优势。

## 2 基坑安全稳定评判的超变形法

超变形准则是以基坑的某些特征部位变形的极限值来判别整个基坑是否稳定的准则。超变形法则是建立在超变形准则基础上的一种判别基坑稳定性的方法,该方法的基本思路是:首先计算基坑在实际施工荷载(开挖荷载,水荷载等)作用下的变形及应力,用超变形准则判断基坑是否失稳以及基坑的薄弱部位,若基坑仍然稳定,则将整个基坑的变形按比例放大,将变形的放大部分看作基坑的初应变施加于整个基坑,计算基坑的响应,直至按超变形准则判断基坑恰好失稳为止。其相应的稳定安全系数  $K_d$  即是基坑破坏时某些特征部位变形放大倍数。该定义类似超荷载安全系数,不同的是这里选择了某些特征部位变形的放大值。

## 3 基坑安全稳定评判的广角度综合评判法

本文提出基坑的广角度综合评判法,即采用多种稳定评判方法对基坑进行评判,最后综合各种评判方法所得出的结论,给出对基坑安全稳定的比较全面的评价,这样可以大大提高基坑的安全稳定性。本文以润扬大桥南锚碇基坑为例,采用广角度综合评判法对其进行评价(此处仅考虑干扰能量法及超变形法两种评判方法)。

## 4 工程实例

### 4.1 工程概况

润扬大桥南锚碇基坑长 67.7 m, 宽 49.7 m, 深 29 m, 各土层的主要物理力学指标见表 1。支护结构采用围护桩加混凝土支撑体系支护,防渗体系采用冻结技术,使基坑周围土层内水冻结来达到防渗效果。

表 1 土的物理力学特性

名称	弹性模量 $E_s/\text{MPa}$	泊松比 $\mu$	重度 $\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	凝聚力 $c/\text{kPa}$	内摩擦角 $\varphi/(\circ)$
浅层粘性土	3	0.35	8.6	16.5	0.70
深层粘性土	8	0.30	8.5	21.0	0.62
浅层砂土	15	0.30	10.1	13.0	0.60
深层砂土	30	0.25	10.4	30.0	0.75
岩层	2 000	0.15	16.5	0	0.81
混凝土	30 000	0.167	25.5		

主要开挖及支护顺序如下:第一级,挖至地表下 2.0 m,第二级,挖至地表下 7.0 m,然后浇注第一道支撑(地表下 2.0 m,高 0.7 m);第三级,挖至地表下 10.50 m,然后浇注第二道支撑(地表下 7.00 m,高 0.8 m);之后,由于实际冻胀力比设计使用的冻胀力大得多,第一道支撑出现大量裂缝,在此情况下,在第二道支撑上部增加了一道加固支撑,此级没有进行开挖(地表下 6.20 m,高 0.9 m);第四级,挖至地表下 14.50 m,然后浇注第三道支撑(地表下 10.50 m,高 0.9 m);第五级,挖至地表下 18.50 m,然后浇注第四道支撑(地表下 14.50 m,高 0.9 m);第六级,挖至地表下 22.50 m,然后浇注第五道支撑(地表下 18.50 m,高 0.9 m);第七级,挖至地表下 26.25 m,然后浇注第六道支撑(地表下 22.50 m,高 0.8 m);第八级,挖至地表下 29.00 m,然后浇注第七道支撑(地表下 26.25 m,高 0.7 m)。

#### 4.2 有限元模型的建立

本文采用三维非线性有限元法计算,围护桩及支撑均采用三维八节点等参元,按弹性计算,土体按邓肯模型考虑其非线性特性,网格图见图 1。在建模过程中,首先进行简化处理,按照对称性取整个结构的四分之一进行分析,围护桩实际为圆形,为了建模的方便,采用刚度等效的方法等效为方形。由于开挖是非线性问题,采用增量有限元法模拟施工过程分八级进行计算(各工况见前述)。

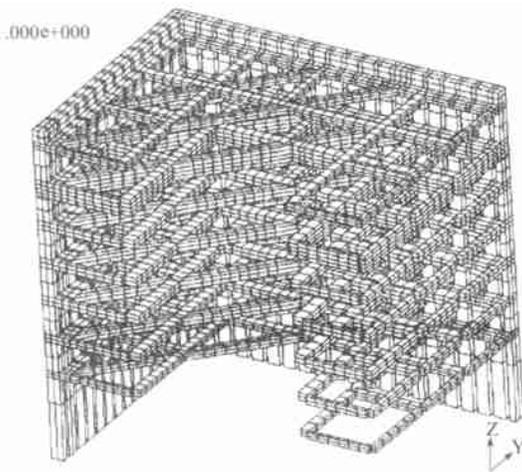


图 1 润扬大桥南锚基坑支撑图

#### 4.3 用干扰能量法对结构的稳定性进行评判

在得到基坑支护体系的应力分布后,针对每一级开挖利用干扰能量法对基坑支护体系进行了稳定性分析,计算成果有基坑支护体系各部位的干扰能量值分布图和支护体系的稳定安全系数值。由于篇幅所

限,本文只列举了前三级开挖后以及基坑最终开挖完工后两种结构工况的计算成果(见图 2、图 3)。

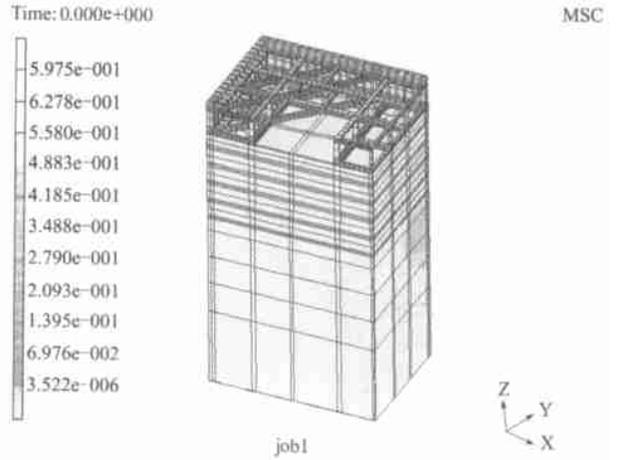


图 2 前三级完成后基坑支护体系的干扰能量分布图

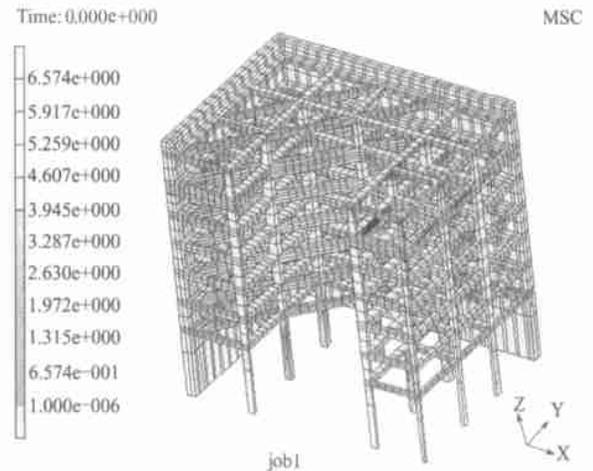


图 3 基坑开挖完工后基坑支护体系的干扰能量分布图

注:图中除少部分(图中较亮处)干扰能量值较大外,其余部分干扰能量值均处在颜色条中黑色部分,故而整体干扰能量图大部分均为黑色。

#### 4.3.1 前三级开挖后的干扰能量成果

基坑在前三级完成后,支护体系各部位的干扰能量值均大于零,支护体系整体的干扰能量值为 3 010 kN·m,此时基坑支护体系的整体稳定安全系数为 1.13。

从基坑支护体系各部位的干扰能量值具体分布情况可看出:基坑前三级完成后,基坑内支撑的干扰能量值高于排桩的干扰能量值,第二层内支撑的干扰能量值高于第一层内支撑的干扰能量值。而对同一层内支撑而言,基坑中间部位的内支撑干扰能量值要高于靠近基坑壁的内支撑的干扰能量值。由此,由干扰能量法稳定性评判准则可得出如下结论,

南锚基坑支护体系内支撑的稳定性总体要好于排桩,而第二层内支撑的稳定性要好于第一层内支撑。

#### 4.3.2 基坑开挖完工后的干扰能量成果

南锚基坑开挖完工后,支护体系各部位的干扰能量值均大于零,整个支护体系的干扰能量值为 17 220 kN·m,此时基坑支护体系的整体稳定安全系数为 2.01。

基坑开挖完工后,基坑支护体系干扰能量值总体分布规律与前三级开挖完成后的相近,也是表现出内支撑的干扰能量值高于排桩的干扰能量值。而对内支撑而言,第二层内支撑相对于其它各层内支撑干扰能量值为最大,按干扰能量法稳定性评判准则可得出第二层内支撑稳定性最好。同样,就同一层内支撑而言,基坑中间部位的内支撑干扰能量值要高于靠近基坑壁的内支撑的干扰能量值。

#### 4.4 用超变形法对结构的稳定性进行评判

根据结构的失效机理,假定当某一根排桩或者某一根内支撑有二处截面出现贯穿性裂缝为破坏标准,此时认定该根排桩或者该根内支撑失效。基于此准则,按照超变形计算原理,在某一级开挖后施加超变形,当某一根排桩或者某一根内支撑开始出现失效时,对应的变形放大倍数即为基坑的安全系数(见表 2)。此时对应的整个支护体系的变形状态给出的各道内支撑和基坑壁排桩相连的这一端上表面点与下底面点处的水平位移差或绝对水平位移作为本级开挖的临界指标。临界变形指标为 149 mm,发生在长边中心,实际监测已达 147 mm,可见该基坑基本达到临界状态,这也与施工过程中监测结果一致。

表 2 各级开挖超变形计算的放大倍数

开挖级数	内支撑失效	排桩失效
第三级	1.5(第一道内支撑)	1.50
第八级	4.00(第七道内支撑)	4.60

#### 4.5 基坑安全稳定评判的广角度综合评判法

应用干扰能量法得出前三级完成后基坑支护体系的整体稳定安全系数为 1.13,基坑开挖完工后基坑支护体系的整体稳定安全系数为 2.01;由超变形法得出前三级完成后基坑支护体系的整体稳定安全系数为 1.5,基坑开挖完工后基坑支护体系的整体稳定安全系数为 4.0。可见润扬大桥南锚深基坑是稳定的。随着基坑开挖往下进行,一方面,基坑支护体系受到的冻胀力不再继续增加,另一方面,受内

部支撑的及时发挥作用,使得基坑整体支护体系的受力更加均匀,最终表现为支护体系整体的稳定性在基坑开挖完工后的稳定安全系数值反而大于基坑在前三级开挖时的稳定安全系数值。

## 5 结 论

1)本文提出了采用多种稳定评判方法进行基坑评价的广角度综合评判法。不同的评判方法的出发点不同,因此所得结果有比较大的偏差,综合考虑各种评判方法的结果,对基坑稳定性作出比较全面的评价是很有必要的。

2)不同的稳定评判方法有各自的优势,如干扰能量可给出局部(甚至每个单元)的稳定性,而超变形法可得出基坑的临界指标等,应该扬长避短,充分发挥各种方法的优越性。

3)本文将干扰能量法引入到基坑的稳定评判中。从理论上来看比较完善,由于干扰能量是标量,因此可极方便地进行局部和整体稳定性的分析。

4)应用干扰能量法得出前三级完成后基坑支护体系的整体稳定安全系数为 1.13,基坑开挖完工后基坑支护体系的整体稳定安全系数为 2.01;由超变形法得出前三级完成后基坑支护体系的整体稳定安全系数为 1.5,基坑开挖完工后基坑支护体系的整体稳定安全系数为 4.0。可见润扬大桥南锚深基坑总体上是稳定的。

## 参 考 文 献

- 杜建成等. 边坡稳定的三维极限平衡分析法. 四川大学学报(工程科学版), 2001, 33(4);
- 李朝国等. 综合法与超载法在沙牌 RCC 拱坝坝肩稳定分析中的应用. 四川联合大学学报(工程科学版). 1997, 1(3): 64~71.
- 钱向东. 复杂基岩稳定分析的弹塑性极限平衡法. 河海大学学报, 1999, 27(6): 16~19.
- 王建仁等. 基坑稳定的人工神经网络预测. 建筑技术开发, 2001, 28(2): 10~13
- 胡 强等. 超变形法及其在深基坑开挖中的应用. 岩土工程技术, 2003, (3): 167~170
- 邵国建等. 厚、薄板稳定分析的干扰能量法. 河海大学学报, 2000, 28(1): 91~95
- 章 青等. 三峡船闸高边坡稳定分析的界面元法与评判准则. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(5): 285~288
- 邵国建等. 岩体稳定性分析与评判准则研究. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(5): 691~696.

收稿日期: 2003-12-22