

# 超变形法及其在深基坑开挖中的应用

胡 强 刘 宁 李锦辉

(河海大学, 南京 210098)

**【摘 要】** 基于超变形准则, 提出了一种新的基坑稳定判定方法——超变形法, 能方便地计算出基坑临界变形指标作为观测警戒指标, 结合实际观测资料, 可对结构在施工期及建成后的稳定性作出直观的评价。还介绍了在润扬大桥南锚碇深基坑稳定的评判中的应用, 结果表明超变形法能较准确的判断结构的稳定性, 应用方便, 能更直观地反映基坑的稳定状况。

**【关键词】** 超变形法; 临界变形指标; 稳定性; 基坑

**【中图分类号】** TU 473.2

## Over-deformation Method and Its Application in Deep Excavation

**【Abstract】** Based on over-deformation rule, a new method to determine the stabilization of pit, over-deformation method, is established. It becomes facility to calculate the critical guideline of the deformation of the pit. Regarding it as the precaution guideline, we can directly evaluate the stabilization of the pit. Finally, it is applied in the evaluation of the RunYang Bridge deep pit's stabilization and it is proved more efficient than other method.

**【Key words】** over-deformation method; critical guideline of deformation; stabilization; foundation pit

### 0 引言

基坑的稳定性已成为整个基坑工程最重要的问题。目前判定基坑稳定性的方法有很多, 主要有刚体极限平衡法, 干扰能量法<sup>[1~3]</sup>, 广角度综合评价法<sup>[4]</sup>等, 但是这些方法都存在各自的缺陷, 且都只能给出定性的评价, 不能直接给出基坑的临界变形指标。

现在大型基坑的施工中都是采用信息化施工<sup>[5]</sup>, 如果事先能给出基坑的临界变形指标, 并以它作为监测警戒指标, 则能更好的利用监测资料, 对基坑的施工及长期监测进行指导。超变形法与超载法<sup>[6]</sup>类似, 将结构的变形量逐步放大, 把放大的变形量转化为荷载施加于结构上, 计算结构的响应, 结构达到其承载极限时对应的变形量即为结构的临界变形

指标。此法不但能得到工程中常用的安全系数, 而且可以得到临界变形指标, 因而可以很直观的判断基坑的稳定性, 并且以临界变形指标作为警戒指标, 对基坑的监测工作有着很重要的指导作用, 从而给以后的施工带来了很大的便利。

### 1 超变形法的基本理论

超变形准则是以结构的某些特征部位变形的极限值来判别岩(土)体是否稳定的准则。超变形法则是建立在超变形准则基础上的一种判别结构稳定性的方法, 该方法的基本思路是: 首先计算结构在实际荷载作用下的变形及应力, 用超变形准则判断结构是否失稳以及薄弱部位, 若结构仍然稳定, 则将整个结构的变形按比例放大, 将变形的放大部分看作结构的

初应变施加于整个结构,计算结构的响应,直至按超变形准则判断结构恰好失稳为止。其相应的稳定安全系数  $K_D$  即是岩(土)体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。它的优点是:可以直接求得极限超变形值,它可以作为本工程及其它类似工程岩(土)体监测的警戒指标;通过放大结构的变形能概化计入人们考虑不周或未考虑到的影响因素的作用(如意想不到的外荷载或材料参数的变化等);实施方法比较简单,只需将因放大而改变的变形量作为已知位移的作用便可求出结构的响应。

超变形准则是探讨岩(土)体稳定性的另一个新的准则,要列入规范还需做很多方向的工作,但作为研究,它毕竟可以为岩(土)体稳定性问题的评判提供一些具有工程价值的成果,也能为该问题的客观评价提供另一角度的参数,起了充实和丰富岩(土)体稳定性研究内容的作用。

## 2 超变形法中存在的几个问题

超变形法中主要存在的两个关键性问题:

- 1) 如何选择某些特征部位的变形问题;
- 2) 如何定义岩(土)体的破坏问题。

对于第一个问题,笔者建议尽可能和岩(土)体的监测部位结合在一起考虑,如边坡坡面位移、深基坑坑壁或支撑体系的位移等便可求出使岩(土)体破坏时的放大倍数和该特征部位的极限变形量,一方面可为岩(土)体稳定性给出超变形安全系数  $K_D$ ,另一方面又可为岩(土)体的监测提供警戒的指标。此外,我们认为,对于通过多方面勘测和分析得到潜在滑面的岩(土)体,选择滑面上下盘相对位移的放大量作为诸多未能考虑因素的外来作用,求出其结构响应,定义使岩体破坏的放大倍数为超变形安全系数,取滑体在地表露头处的相对位移量作为警戒指标对于评判岩(土)体的稳定性也是具有工程价值的。

对于第二个问题要作出严格的定义是相

当困难的,我们只能以使岩(土)体本身或基坑支撑体系不能正常工作时定义为破坏。所谓岩(土)体本身能否正常工作可以借助极限平衡准则或干扰能量准则判别其是否稳定来衡量;所谓基坑支撑体系能否正常工作,可视具体排桩和内支撑的受力状态提出不同的判据,对于排桩和内支撑作用下的深基坑,可以排桩和内支撑出现贯穿性裂缝为破坏标准等等。

## 3 工程实例

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

土 层	弹 模 $E/\text{MPa}$	泊松比 $\nu$	重 度 $\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	粘聚力 $c/\text{kPa}$	内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$
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 2.00 m;第二级,挖至地表下 7.00 m,然后浇注第一道支撑(地表下 2.00 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);

用三维非线性有限元法计算出各道支撑的内力。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。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)。

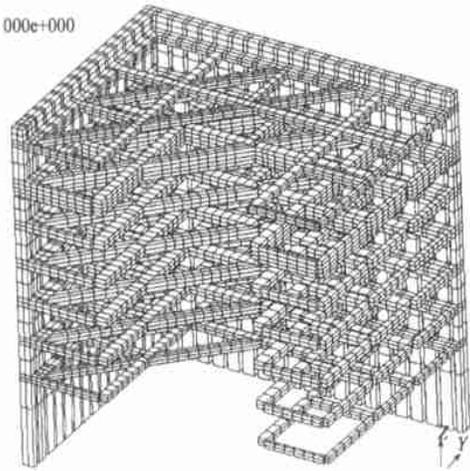


图 1 润扬大桥南锚基坑支撑图

在基坑施工开挖过程中的稳定性与否取决于排桩和内支撑体系的稳定性, 而排桩的临界破坏状态或失稳由某一根排桩的失效为基准, 同样内支撑的临界破坏状态或失稳由某一根内支撑的失效为基准。在利用有限元法对基坑支护体系进行数值分析时, 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, 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。

在施加超变形过程中, 对每级开挖均进行相应的超变形计算分析, 而对某级开挖的超变形施加按本级开挖引起的增量位移放大若干倍进行, 直至某一根排桩或者某一根内支撑开始出现失效时停止计算。这样, 在每级开挖(基坑开挖共分为八级开挖完成)过程中, 各级施工开挖下的相应的变形放大倍数对应下的变形状态即为变形临界指标值, 供基坑施工开挖过程中变形监控时参考。

按前述超变形计算思路, 对基坑各级开挖超变形进行了计算, 即将原始位移进行放大, 将变形的放大部分看作初应变施加于整个基坑, 直到达到基坑的极限状态, 相应的放大倍数列见表 2。一般混凝土抗拉强度取为  $1/8 \sim 1/12$  的抗压强度, 针对基坑支护体系的 C30 混凝土, 在具体计算时取混凝土抗拉强度为 2.5 MPa。由于本文篇幅有限, 只给出第三级开挖及开挖结束时的超变形计算前后 X, Y 方向位移对比图(见图 2 图 3)。图 2 图 3 中位移 1 表示支撑发生失效时位移, 位移 2 表示排桩发生失效时位移。

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
第二级	1.80(第一道内支撑)	1.50
第三级(*)	1.80(第二道内支撑)	3.00
第三级(**)	1.5(第一道内支撑)	1.50
第四级	3.0(第一道内支撑)	1.50
第五级	3.20(第三道内支撑)	1.50
第六级	4.4(第四道内支撑)	2.30
第七级	1.90(第六道内支撑)	5.20
第八级	4.00(第七道内支撑)	4.60

注: 因第一级开挖时, 第一道内支撑未施加, 且不作为控制工况, 也无需进行超变形计算; 表 1 中的第三级(\*)表示第二道内支撑未进行补强处理(未设附加支撑); 第三级(\*\*)表示第二道内支撑进行补强处理后(设附加支撑)。

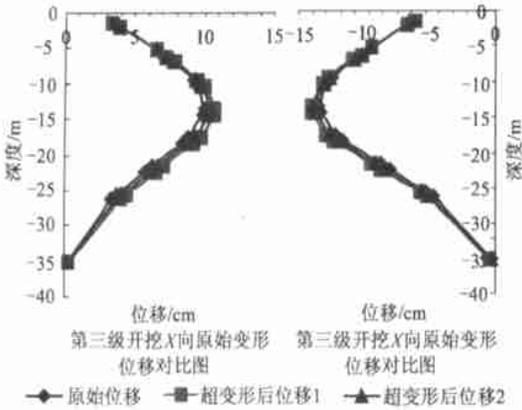


图2 第三级开挖结束时原始位移与超变形计算位移对比图

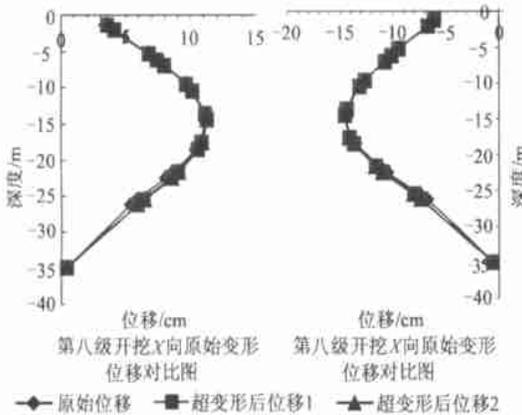


图3 第八级开挖结束时原始位移与超变形计算位移对比图

从表1各级开挖过程超变形计算得到对应的增量位移放大倍数来看,在增加附加支撑后,基坑的整体稳定性有了一定改善,这与实际施工过程中完全相符。在第二道内支撑不设附加支撑情况下,在第三级开挖后引起第一道内支撑失效时增量位移的放大倍数小于排桩失效时的增量位移放大倍数。当第二道内支撑设附加支撑情况下,此时,在第七级开挖引起第六道内支撑失效和第八级开挖引起第七道内支撑失效时增量位移的放大倍数小于排桩失效时的增量位移放大倍数外,其它各级开挖过程中表现为内支撑失效时增量位移的放大倍数均大于排桩失效时的增量位移放大

倍数。因此,在该工程中,由于排桩的失效引起整个基坑失稳的可能性更大。从图2图3可以看出,临界变形指标为149 mm,发生在长边中点,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。

#### 4 结论

1)本文以超变形准则为基础,提出了一种新的基坑稳定的判定方法—超变形法。实施该方法比较简单,与其它判定方法一样,不但可以给出基坑的安全系数,同时,计算得到的临界变形指标可以作为监测警戒指标,对于施工过程中及建成后的监测有很重要的意义。

2)从本文的算例可以看出,润扬大桥南锚碇基坑的临界变形指标约为149 mm,该基坑基本达到临界状态。这与实际观测中支撑及排桩上出现的大量微裂缝相符合。原因主要是由于设计过程中对冻胀力的考虑不足有关。另外还可看出,加上附加支撑后,基坑的安全性有一定的提高。

#### 参考文献

- 1 卓家寿等.工程稳定问题中确定滑塌面、滑向与安全度的干扰能量法.水利学报,1997(8):80~84
- 2 陈志坚等.干扰位移法及层状岩质边坡滑动边界的确定.岩石力学与工程学报,2000,19(5):630~633
- 3 高凌.工程稳定问题的干扰能量法:[学位论文].南京:河海大学,1993.
- 4 冯兆祥.大型桥梁地基基础稳定性数值分析方法及监测系统理论的研究:[学位论文].南京:河海大学,2002.
- 5 朱合华等.深基坑工程动态施工反演分析与变形预报.岩土工程学报.1998,20(4):30~35
- 6 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