

深基坑支撑体系可靠度计算研究

胡 强¹ 郭志川¹ 刘 宁¹ 车 薇²

(1.河海大学土木工程学院,江苏 南京 210098;2.河海大学设计院,江苏 南京 210098)

摘要 根据钢筋混凝土偏心受压构件的设计理论,建立了深基坑内部支撑的功能函数.考察各杆件的受力情况,忽略其中受力较小的杆件,运用几何法计算剩余内部支撑杆件可靠度.同时把整个支撑体系看成是具有串联子系统的串联系统,并对其进行体系可靠度计算.结果表明,用体系可靠度来反映基坑支撑的稳定性较为合理,为基坑支撑的可靠度研究提供了一种更有效的方法.

关键词 串联系统;可靠度;基坑;支撑体系

中图分类号 :TU470⁺.3 **文献标识码** :A **文章编号** :1000-1980(2003)06-0674-04

大型深基坑开挖过程中,支护体系的稳定性是整个基坑稳定的关键之一.传统的稳定分析方法是采用安全系数来表征整个基坑支撑体系的稳定性.然而深基坑开挖中存在着大量的不确定性因素^[1],如土性参数、荷载、结构抗力等,安全系数法对此显得无能为力.目前采用概率分析的方法,计算基坑支撑的体系可靠度,并用失效概率来表示基坑支撑体系的稳定性.在基坑支护结构体系的可靠度研究方面,大多数文献均以某根杆件为研究对象,计算其可靠度,并以此来表征整个基坑支撑体系的稳定性.事实上,基坑的支护结构是一个整体,应该以整个支撑体系为研究对象,计算该体系的可靠度,从而得到整个基坑支护体系的失效概率.

本文基于钢筋混凝土偏心受压构件的设计理论^[2],建立了深基坑支撑杆件的功能函数,针对该功能函数运用几何法进行基坑支撑杆件的可靠度分析.同时将基坑支撑体系看成是各道支撑组成的串联系统,而对于每道支撑,在剔除各次要杆件(轴力和弯矩较小的杆件)后,可以看成是各杆件组成的串联系统,因此,整个支撑体系可以看成是具有串联子系统的串联系统.本文采用逐步等效线性化 Johnson 求并法求每道支撑的体系可靠度,然后利用 Ditlevsen 窄界限法求整个支撑体系的体系可靠度,最后对润扬大桥南锚碇深基坑支护体系进行体系可靠度计算.

1 支撑杆件的可靠度

1.1 支撑杆件的功能函数

深基坑开挖的内部支撑体系材料一般为钢筋混凝土,主要承受轴力和弯矩作用.根据偏心受压构件设计理论,需要对其正截面承载能力(弯矩和轴力)和斜截面承载能力进行复核.由于内部支撑所承受的剪力一般很小,故没有必要进行斜截面承载能力复核,只要正截面承载能力能满足要求即可.因此,内部支撑体系的功能函数可根据其正截面极限承载能力来建立.根据偏心受压构件设计理论,本文对内部支撑杆件的轴力承载能力和弯矩承载能力建立相应的功能函数.

支撑杆件的轴力承载能力功能函数及弯矩承载能力功能函数如下:

$$Z = g(X_1, X_2, \dots, X_n) = N_u - N \quad (1)$$

$$Z = g(X_1, X_2, \dots, X_n) = M_u - M \quad (2)$$

式中: N_u ——支撑杆件轴力极限承载能力; N ——支撑杆件计算轴力; M_u ——内部支撑弯矩极限承载能力; M ——内部支撑计算弯矩.

1.2 支撑杆件的可靠度计算

钢筋和混凝土的功能函数建立后,即可分别求得相应的轴力承载能力和弯矩承载能力可靠指标,选取二

者中较小的值作为支撑的可靠指标,可靠指标可采用 JC 法或几何法求解.几何法是根据可靠指标 β 的几何意义,采用迭代法计算结构的可靠指标.其思路是:先假设设计验算点 X^* ,将验算点值代入极限状态方程 (1)(2),此时 $g(X^*) \neq 0$,沿着 $g(X) = g(X^*)$ 所表示的空间曲面在 X^* 点处的梯度方向前进或后退,得到新的验算点,将新的验算点代入极限状态方程,如果 $g(X^*) > \epsilon$ (ϵ 为所规定的离极限状态方程所表示的失效边界的距离的精度要求),则继续进行迭代,如果 $g(X^*) \leq \epsilon$,则表示验算点已在失效边界上,停止迭代,即可求出 β 值及设计验算点的值.几何法的具体求解方法可参见文献 [3].

2 内部支撑的体系可靠度计算

如果一个系统中所有元素全都失效时,该系统才失效,则该系统就是并联系统.而当系统中的任一元素失效时该系统就失效,则该系统就是串联系统.一个结构不论形式简单还是复杂,总可以看成由若干失效模式(或称失效路径、破坏通道)组成,而任一失效模式的发生都将导致结构的整体破坏,因此,结构体系的失效概率由所有的失效模式决定,结构体系可看成由失效模式组成的串联系统^[4].

内部支撑体系由各道支撑组成,认为任何一道支撑的失效都会导致内部支撑体系的失效,各道支撑中每个杆件的失效都会导致该道支撑的失效.但是注意到其中大部分的杆件(一般可以达到 50% ~ 80%)承受的荷载比较小,杆件的轴力和弯矩也较小,这些杆件的可靠指标较其它杆件大得多,在计算体系可靠度时可以忽略不计,这样可以大大减少计算量.因此,内部支撑体系可以认为是各个失效模式为各道支撑的串联系统,各道支撑可以认为是各个失效模式为支撑杆件的串联子系统.整个体系则表现为具有串联子系统的串联系统.这样不仅可以对每道支撑的体系可靠度和整个支撑体系的体系可靠度进行评价,而且概念明确清晰.

2.1 各道支撑组成的支撑体系串联系统的体系可靠度计算

串联系统中,当系统的任何一个元素失效时系统都会失效,失效概率可写为

$$P_f = P_f(g_1 \leq 0 \cup g_2 \leq 0 \cup \dots \cup g_n \leq 0) = P_f(\bigcup_{i=1}^n g_i \leq 0) = \int_{\mathbb{R}^n} f(x_1, x_2, \dots, x_n) dx_1 dx_2 \dots dx_n \tag{3}$$

式中 $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 是 n 维联合概率密度函数.由于在结构体系元件较多的情况下,直接积分将十分复杂,因此人们往往采用近似的方法.计算方法主要有:Monte-Carlo 法、近似计算法和界限估计法.本文采用界限估计法,具体公式参见文献 [5].

2.2 各杆件组成的各道支撑串联子系统的体系可靠度计算

对于工程结构系统,整个系统(串联系统)的失效概率用界限法计算一般可以接受,而对于串并联子系统,如果仍用界限法给出一个界限范围,很难再进一步得出整个系统的可靠度.本文采用逐步等效线性化 Johnson 求并法,可以高效估算出串联子系统的可靠度,这对于求解大型复杂结构的体系可靠度十分有效.

该方法的基本思路是, n 个失效事件的并集计算,可通过逐步等效线性化的方法近似获得,即先将第 1 和第 2 失效事件并集的失效边界等效线性化,然后计算等效线性后的失效事件与第 3 失效事件的并集,依此类推.具体方法参见文献 [6].

3 算 例

根据上述方法编制了相应的计算程序,对润扬大桥南锚碇基坑支撑体系可靠度进行了计算,计算结果比较真实的反映了整个基坑体系的安全性.

润扬大桥南锚碇基坑长 67.7 m,宽 49.7 m,深 35 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.

主要开挖及支护顺序如下:第 1 级,挖至地表下 2.00 m;第 2 级,挖至地表下 7.00 m,然后浇注第 1 道支撑(地表下 2.00 m,高 0.7 m);第 3 级,挖至地表下 10.50 m,然后浇注第 2 道支撑(地表下 7.00 m,高 0.8 m);第 4 级,由于实际冻胀力比设计使用的冻胀力大得多,第 1 道支撑出现大量裂缝,在此情况下,第 2 道支撑上部增加 1 道加固支撑(地表下 6.20 m,高 0.9 m);第 5 级,挖至地表下 14.50 m,然后浇注第 3 道支撑(地表下 10.50 m,高 0.9 m);第 6 级,挖至地表下 18.50 m,然后浇注第 4 道支撑(地表下 14.50 m,高 0.9 m);第 7 级,挖至地表

下 22.50 m 然后浇注第 5 道支撑(地表下 18.50 m 高 0.9 m);第 8 级 挖至地表下 26.25 m 然后浇注第 6 道支撑(地表下 22.50 m 高 0.8 m);第 9 级 挖至地表下 29.00 m 然后浇注第 7 道支撑(地表下 26.25 m 高 0.7 m)。

表 1 土的物理力学特性

Table 1 Physical and mechanical parameters of the samples

土层	厚度 /m	弹模 /MPa	泊松比	密度 ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	粘聚力 C /kPa	摩擦角 φ ($^{\circ}$)
浅层粘性土	11	3	0.35	8.6	16.5	0.70
深层粘性土	8	8	0.30	8.5	21.0	0.62
浅层砂土	23	15	0.30	10.1	13.0	0.60
深层砂土	5	30	0.25	10.4	30.0	0.75
岩层	10	2000	0.15	16.5	0	0.81
混凝土		3000	0.16	25.5		

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,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,可采用增量有限元法模拟施工过程,分 8 级进行计算。

计算出各支撑杆件的轴力及弯矩后,剔除轴力弯矩较小的杆件(这些杆件的可靠指标比较大),然后按照本文中所建立的功能函数计算各杆件的元件可靠度,利用逐步等效线性化 Johnson 求并法计算各道支撑的体系可靠度,结果见表 2。再计算各道支撑的失效模式(即各道支撑)之间的相关系数,见表 3。表 3 中各个失效模式与表 2 中各道支撑相对应。最后利用 Ditlevsen 提出的窄界限法计算整个支撑的体系可靠度。

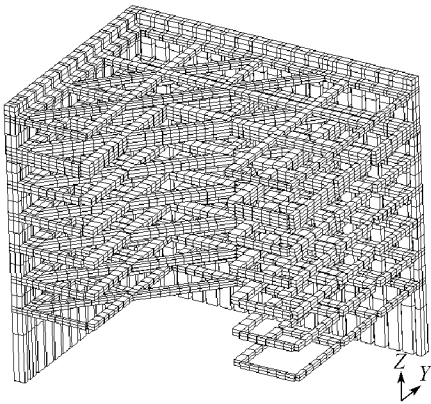


图 1 润扬大桥南锚基坑支撑
Fig.1 South anchor foundation pit supports of Runyang Bridge

表 2 各道支撑的体系可靠度

Table 2 System reliability of support

支撑	体系可靠度
第 1 道	0.6
加固	2.4
第 2 道	1.5
第 3 道	2.0
第 4 道	2.3
第 5 道	3.4
第 6 道	3.1
第 7 道	3.1

表 3 各道支撑失效模式之间的相关系数

Table 3 Correlation factor of support-failure mode

失效模式	1	2	3	4	5	6	7	8
1	1.00	0.53	-0.22	0.01	0.10	0.00	-0.25	-0.04
2	0.53	1.00	-0.25	0.00	0.10	0.00	-0.27	-0.04
3	-0.22	-0.25	1.00	0.05	0.00	0.03	0.33	0.08
4	0.01	0.00	0.05	1.00	0.01	0.01	0.06	0.02
5	0.10	0.10	0.00	0.01	1.00	0.01	-0.01	0.01
6	0.00	0.00	0.03	0.01	0.01	1.00	0.03	0.01
7	-0.25	-0.27	0.33	0.06	-0.01	0.03	1.00	0.09
8	-0.04	-0.04	0.08	0.02	0.01	0.01	0.09	1.00

从表中可以看出,内部支撑体系的失效概率为 27.4% ~ 38.9%。内部支撑体系的失效概率较大。在增加了加固支撑,保证第 1 道支撑和第 2 道支撑不失效的前提下,内部支撑体系的失效概率为 3.67% ~ 3.98%,其失效概率大大减小,体系可靠度增大。可见,由于第 1 道支撑和第 2 道支撑的体系可靠指标较小,导致内部支撑体系的失效概率较大。因此,增加了加固支撑对保证支撑体系以及基坑的稳定是非常关键和行之有效的。

4 结 论

a. 大型深基坑开挖中存在着大量的不确定性因素,采用可靠度的方法对基坑支护的稳定性进行评估则显得更为合理,具有重要的实际工程意义。

b. 大型深基坑开挖中,其内部支撑体系可以认为是各个失效模式为各道支撑(剔除各次要杆件)的串联系统,各道支撑可以认为是各个失效模式为支撑杆件的串联子系统,整个体系则表现为具有串联子系统的串

联系统.这样不仅可以对每道支撑的体系可靠度和整个支撑体系的体系可靠度进行评价,而且概念明确清晰.

c. 通过本文算例可以看出,大型深基坑每道支撑的体系可靠度均对整个支护结构的体系可靠度的影响很大,因此要保证大型深基坑的稳定必须保证每道支撑的稳定,对那些体系可靠度较小的支撑应采取加固措施.

参考文献：

[1] 高大钊.土力学可靠性原理[M].北京:中国建筑工业出版社,1989.5—7.
[2] 张岐宣.混凝土结构设计[M].南京:江苏科学出版社,1994.222—228.
[3] 吕泰仁,吴世伟.用几何法求构件的可靠指标[J].河海大学学报,1988 (5) 86—93.
[4] 刘宁.基于三维弹塑性随机有限元的结构体系可靠度计算[J].工程力学,1995 (11) 443—448.
[5] 吴世伟.结构可靠度分析[M].北京:交通出版社,1988.210—211.
[6] 刘宁.可靠度随机有限元法及其工程应用[M].北京:中国水利水电出版社,2001.41—43.

Reliability calculation for deep foundation pit support system

HU Qiang¹, GUO Zhi-chuan¹, LIU Ning¹, CHE Wei²

(1. College of Civil Engineering, Hohai Univ., Nanjing 210098, China ;
2. Design Institute, Hohai Univ., Nanjing 210098, China)

Abstract :Based on the design theory for eccentrically compressed reinforced concrete members, a function is established for the internal support of deep foundation pits. By examination of the stress state of each rod and with negligence of the rods in low stress state, the geometry method is applied to calculation of the reliability of residual internal support rods. Meanwhile, the whole support system is taken as a series system consisting of various subsystems, and the reliability of the system is calculated. The results show that it is reasonable to use the system reliability to reflect the stability of foundation pit supports. The present study provides an effective method for research of the reliability of foundation pit supports.

Key words :series system ; reliability ; foundation pit ; support system