

文章编号:1005-0523(2015)01-0071-07

基于 Monte Carlo 法的深基坑支护结构可靠度研究

万志辉,刘红艳,步艳洁,张 旭

(辽宁工业大学土木建筑工程学院,辽宁 锦州 121001)

摘要:对某隧道基坑工程的施工监测数据进行了分析,得出了基坑开挖施工过程中,桩-内撑支护结构中桩体的水平位移随开挖深度的变化规律。提出了该种结构可靠度指标并编制了基于 Monte Carlo 法的深基坑支护结构桩体水平位移可靠度分析程序。对实例工程的四个施工工况分别进行了计算,结果表明:可靠度分析计算结果与实例监测结果一致,符合性好。

关键词:深基坑;支护结构;监测数据;Monte Carlo 法;可靠度分析

中图分类号:TU473.2

文献标志码:A

基坑工程的设计与施工由传统的以强度控制为主,转向了今天的以变形控制为主,因此,变形控制的设计与施工显得愈加重要^[1]。对于深基坑支护结构来说,桩体水平位移是围护结构的安全状况重要指标,也是设计与施工的变形控制重要指标之一,因此对桩体水平位移必须进行严格的控制。桩体水平位移受众多的不确定性因素影响,可以采用可靠度方法来评价深基坑支护结构的安全性。对于深基坑支护结构的可靠度研究许多学者进行了分析^[2-5]。文章对隧道基坑工程桩-内撑支护结构桩体水平位移现场监测数据进行分析,采用 Monte Carlo 法对深基坑支护结构桩体水平位移进行可靠度研究,结合工程实例,考虑土性参数等的随机性和变异性特征,计算各阶段支护结构的可靠度指标,用以分析深基坑支护结构安全稳定性,为深基坑工程的设计与施工提供指导性建议。

1 桩-内支撑支护结构的 Monte Carlo 法可靠度理论

1.1 极限状态方程

对于桩-内支撑支护结构,当在基坑开挖面以上未架设内支撑时,支护结构绕桩底端点转动,使其桩顶向基坑内侧产生最大位移;当在基坑开挖面以上架设内支撑时,由于内支撑的作用,围护桩体的变形逐渐转向弓形,最大水平位移发生的部位也逐渐下移。着眼于桩体最大水平位移,对深基坑支护结构进行可靠度分析,据此建立极限状态方程:

$$Z = f_{\max} - f \quad (1)$$

式中: $f_{\max}$ 为基坑支护桩体水平位移控制值; f 为桩体最大水平位移计算值。

当 $Z > 0$ 时,则深基坑支护系统安全,不会发生破坏;当 $Z < 0$ 时,则深基坑支护系统不安全,会发生破坏;当 $Z = 0$ 时,则表现为桩体水平位移计算值达到了桩体水平位移控制值,此时,深基坑系统处于极限平衡状态,此式即为深基坑支护结构桩体水平位移可靠度分析的极限状态方程。

1.2 可靠度指标计算与选取

Monte Carlo 法确定可靠度指标 β 值的基本步骤如下。

收稿日期: 2014-10-07

作者简介: 万志辉(1990—),男,硕士研究生,研究方向为深基坑工程设计理论与施工技术;刘红艳(1966—),女,教授,博士,研究方向为深基坑工程设计理论与施工技术。

1) 将工程中的 γ, C, ϕ 等值产生 $(0,1)$ 区间的均匀分布随机数序列 $\{r_i\}$, 在此基础上, 通过反函数法将随机数序列 $\{r_i\}$ 转化为相对应的 γ, C, ϕ 正态分布的随机数, 则 $X_i = F^{-1}(r_i)$, 即转化为给定分布的随机变量 $X_1, X_2, \dots, X_n$ 。

2) 设定总模拟次数 N 。只需模拟次数足够大, 就可以得到相当精度的结果, 一般模拟次数在 5 000 ~ 10 000 次能满足精度要求, 为了得到较高的模拟精度, 采取总模拟次数 $N=10\ 000$ 次。

3) 将产生的随机变量代入功能函数中 $Z = g(X_1, X_2, \dots, X_n)$ 进行计算, 得到 $Z < 0$ 的次数为 L , 则工程结构的失效概率与可靠度指标可由下式算得:

$$P_f = P(Z < 0) = P(g(X_1, X_2, \dots, X_n) < 0) = L/N \quad (2)$$

当随机变量为正态分布时, 可由 $\beta = -\Phi^{-1}(P_f)$ 求解相应的可靠度指标。

目前, 在岩土工程中目标可靠度 β_0 取值尚未给出明确的规定。文献[8,9]中提出在地基承载力与地基变形可靠度计算时, 目标可靠度指标分别取 0.95, 0.85; 在深基坑支护结构抗倾覆破坏稳定可靠度计算时, 目标可靠度指标取 1.5; 在桩锚支护结构稳定性分析计算中, 基坑的安全等级为一、二级时, 目标可靠度指标分别取 2.5, 2.0。考虑到深基坑支护工程受众多的不确定性因素影响, 为了满足基坑支护结构的可靠性并考虑在基坑工程的经济性, 深基坑支护结构的目标可靠度指标 β_0 取 2.0, 相应的失效概率 P_{f0} 为 2.28%。

1.3 可靠度指标计算程序

采用 Matlab 语言编程, 将上述 Monte Carlo 法计算可靠度指标的基本步骤编制成计算机程序(例如 γ 正态分布的随机数编程序: $\gamma = \text{normrand}(\text{Mu}, \text{Sigma}, m, n)$ 产生服从 $N(\mu, \sigma^2)$ 分布的 m 行 n 列随机数组 γ), 得到桩-内支撑支护结构桩体水平位移的可靠度分析计算程序, 以求失效概率 P_f 及相应的可靠度指标 β , 将得到的可靠度指标与目标可靠度指标进行比较, 进而评价桩-内支撑支护结构的安全稳定性。程序计算流程图如图 1 所示。

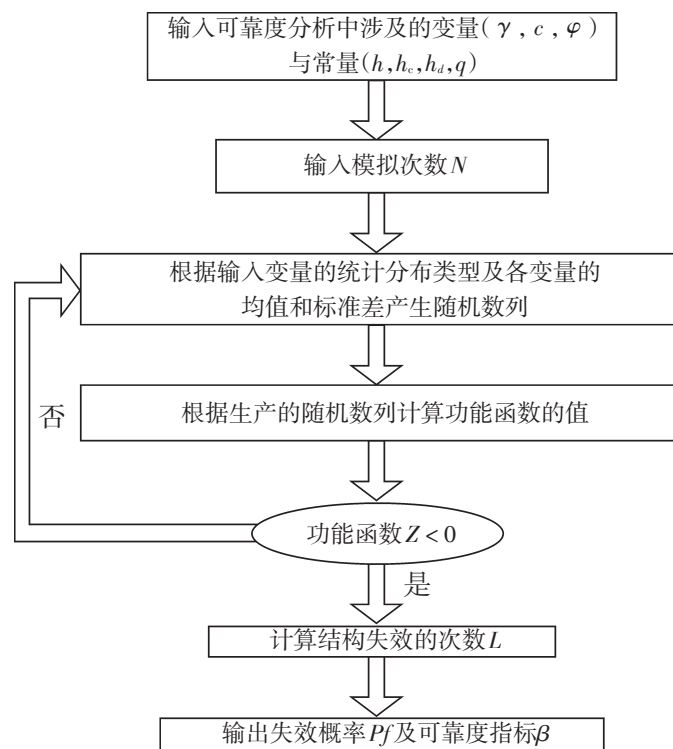


图 1 程序计算流程图

Fig 1 The program flow chart of calculating

2 工程实例分析

2.1 工程概况

成都至都江堰新建铁路离堆公园支线双线隧道工程,该隧道工程是由二环路和太平街行进水文化广场,总长度3 241 m。以DK50+490-DK50+793隧道区段明挖顺作法施工为研究对象,该区段开挖深度约为13.5 m,标准宽度为12.1 m。

本区段所处区域为成都平原冰水-流水堆积地貌,土质以细砂、卵砾石层为主,根据岩土工程勘探报告提供的土体力学参数,对各参数进行统计处理,得出各主要土层分布及其力学参数指标如表1所示。该段位于人口密集、建筑高大稠密、交通拥挤的地段。另外,由于汶川地震影响,周围建筑出现裂缝,存在危楼较多,根据本区段隧道地下管线以及工程周边环境等综合影响因素,确定该隧道某基坑工程安全等级为二级。

表1 土层物理力学参数指标

Tab 1 The soil physical and mechanical parameter

土层名称	层厚 /m	重度 $\gamma/\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\phi/(\text{°})$
细砂	2	18.6	9.5	30.4
松散卵石土	6.5	21	1.6	42.2
密实卵石土	11	23.1	4.0	44.8

2.2 基坑支护结构及监测方案

基坑围护结构采用钻孔灌注排桩+内支撑的型式。采用 $\Phi 1\ 000@2\ 400$ 钻孔灌注排桩,混凝土强度等级为C25,主筋 $24\Phi 28$,配筋率为1.9%,钻孔灌注桩埋入深度19.5 m。在施工前对围护结构及施工期间对主体结构采用管井降水,降水深度不应小于开挖面以下0.5 m。内支撑采用 $\Phi 609$ 的钢管,支撑竖向分两道支撑,分别布置在-0.5 m,-6.5 m处,水平间距为4 m。本区段基坑地质及支护结构剖面图如图2(a)所示。

围护桩桩体变形采用CX-03型测斜仪进行测试,施工之前在钻孔灌注桩的钢筋笼上预埋带导槽优质PVC测斜管,本区段内围护桩桩体侧移布设监测点CX1、CX2。详细的监测方案和监测方法可参见文献[6]。

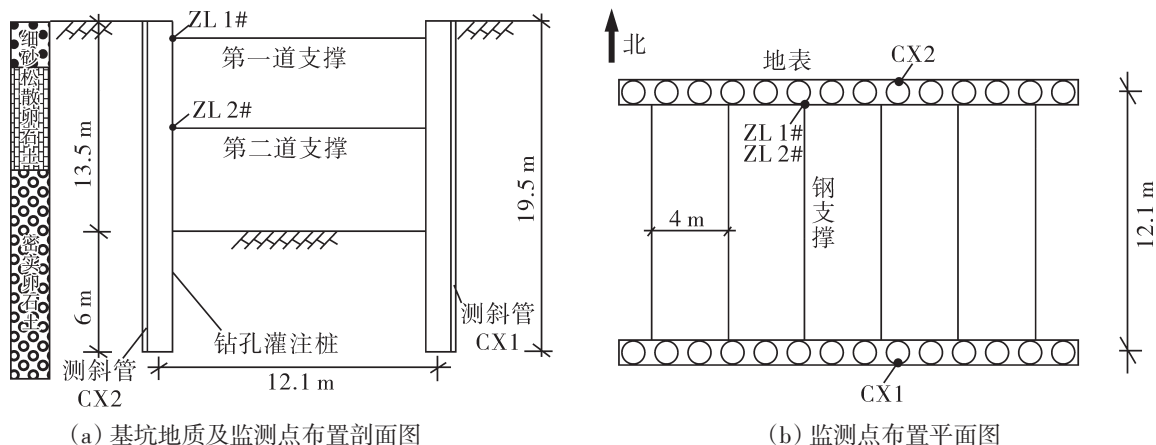


图2 本区段基坑地质剖面图及监测点布置图

Fig.2 Fig 2 The section foundation pit geological profile and the monitoring plan

2.3 监测数据分析

桩体水平位移能够直接反映围护结构的变形,是围护结构的重要安全指标。现选取测斜孔 CX1 的监测数据进行分析研究。开挖过程中监测点 CX1 桩体水平位移曲线如图 2 所示。基坑开挖步骤如表 3 所示。

从图3中可知,在基坑开挖初期,由于未施加支撑,围护桩呈悬臂状态,最大水平位移发生在桩顶。随着第一道支撑的施加(钢支撑预加轴力设计值为250 kN),围护桩体的变形由前倾型逐渐向弓形变化,桩体

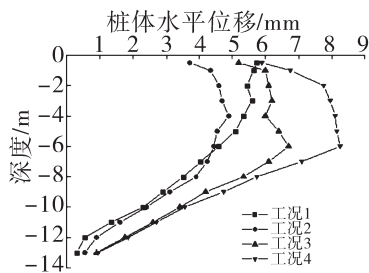


图3 施工过程监测点CX1桩体水平位移曲线
Fig.3 The construction process of monitoring
CX1 pile horizontal displacement curve

表2 基坑开挖步骤

Tab.2 Excavation steps

工况	基坑施工阶段
1	4月3日第一次开挖(-6 m)
2	4月10日架设第一道支撑(-0.5 m)
3	4月27日开挖至坑底(-13.5 m)
4	4月28日架设第二道支撑(-6.5 m)

的最大水平位移也随之向下,发生在4.5 m处。在基坑开挖至坑底且未架设第二道支撑后,桩体水平位移继续增大,桩体最大水平位移发生在6 m处,但桩顶受到第一道支撑约束作用,增大速率有所减下。架设第二道支撑后,桩体水平位移应有减小趋势,由于施工过程中产生的时空效应,围护桩体水平位移还在继续增大,因此,基坑开挖结束后应减少基坑暴露时间,尽快进行结构施工。各工况的监测结果都明显小于该监测项目的控制值30 mm(达到控制值的80%时,需作为预警值预警),所以该基坑工程是安全的。

3 对四种工况的桩体水平位移进行可靠度分析

考虑到基坑周边施工堆载、来往车辆产生动载等因素,施加地表均布超载 $q=20\text{ kPa}$,土体力学参数按前述所给出,为简化计算,将 γ, c, ϕ 值按19.5 m范围内的加权平均值计算,得到重度 $\gamma=21\text{ kN}\cdot\text{m}^{-3}$,黏聚力 $c=3.76\text{ kPa}$,内摩擦角 $\phi=42.46^\circ$,相应的变异系数取为 $\delta_\gamma=0.1, \delta_c=0.3, \delta_\phi=0.3$ 。根据参考文献[4],假定 γ, c, ϕ 均服从正态分布,且各参数变量相互独立。

3.1 悬臂状态支护结构可靠度分析

基坑第一步开挖,开挖至地表下6 m且未施加架设钢支撑,围护桩呈悬臂状态,最大水平位移发生在桩顶(5.75 mm)。将该基坑支护结构在土层中所受的土压力分解成三个三角形荷载(峰值分别为 q_1, q_2, q_3),因此,基坑支护结构的桩顶水平位移分别在其作用下所产生的桩顶水平位移叠加求得,工况1悬臂支护结构土压力分布如图4所示。

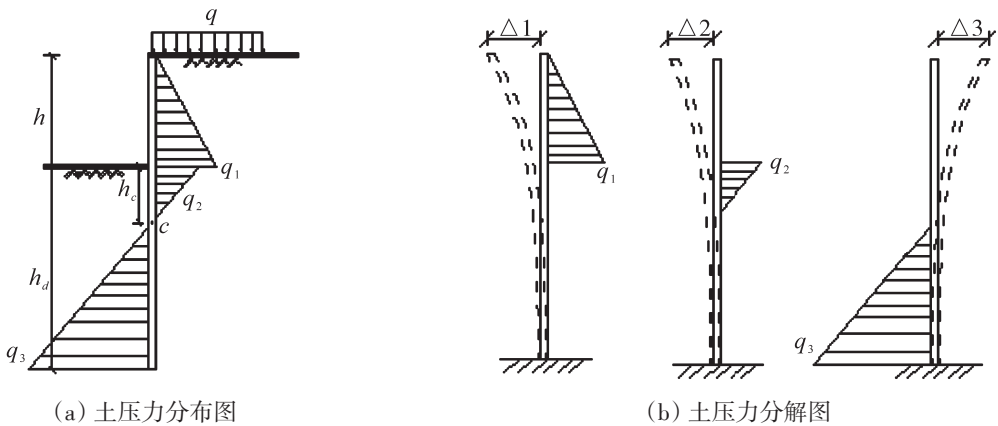


图4 工况1悬臂支护结构土压力分布图

Fig.4 Condition 1 cantilever distribution of earth pressure of retaining structure

可知^[10]

$$\Delta_1=\frac{q_1hl^3}{30EI}[5-5\frac{h}{l}+(\frac{h}{l})^3]$$

$$\Delta_2 = \frac{q_2 h_c}{72EI} [18(h_d - \frac{h_c}{3})^2 l - 6(h_d - \frac{h_c}{3})^3 + (h + \frac{h_c}{3})h_c^2 + \frac{2h_c^3}{45}]$$

$$\Delta_3 = \frac{q_3(h+h_c)^4}{30EI} [1 + \frac{5(h+h_c)}{4(h_d-h_c)}]$$

式中: q_1, q_2, q_3 为按 Rankine 土压力理论计算的土压力强度, $h_c = \frac{(q+\gamma h)K_a - 2c\sqrt{K_a} - 2c\sqrt{K_p}}{\gamma K_p}$, h 为基坑开挖深度, h_d 为桩体嵌入深度, h_c 为基坑面至桩体上土压力零点 c 的距离, l 为钻孔灌注桩的总长度, $K_a = \tan^2(45^\circ - \frac{\phi}{2})$ 、 $K_p = \tan^2(45^\circ + \frac{\phi}{2})$ 分别为主、被动土压力系数, EI 为桩身抗弯刚度。参照《建筑桩基技术规范》(JGJ94-2008)^[11], 对于钢筋混凝土桩, $EI = 0.85E_c I_0 = 1386 \text{ MPa} \cdot \text{m}^4$; 其中 E_c 为混凝土弹性模量, I_0 为桩身换算截面惯性矩。因此, 桩顶的水平位移 $f = \Delta_1 + \Delta_2 - \Delta_3$, 则极限状态方程 $Z = f_{\max} - f = 30 - (\Delta_1 + \Delta_2 - \Delta_3)$ 。

按照前述的方法, 将上述公式编成 Matlab 语言程序, 经计算得出, $\beta = 2.1419 > \beta_0$, $P_f = 1.61\%$ 。因此, 当基坑开挖至地表下 6 m, 未架设第一道支撑时, 该工况深基坑支护结构可靠度满足设计要求, 基坑工程的安全是可以得到保证, 因此, 该工程基坑开挖深度与支撑架方案是合理的, 同时根据监测数据分析的结果也说明建立的可靠度分析计算程序是正确的。

3.2 单支撑支护结构可靠度分析

基坑开挖至地表下 6 m 并架设第一道支撑, 基坑支护型式由悬臂支护结构转化为单支撑支护结构, 同时, 围护桩体的变形由前倾型逐渐向弓形变化, 桩体的最大水平位移发生在 4.5 m 处 (4.95 mm)。按工况 1 形式将该单支撑支护结构在土层中所受的土压力分解成 3 个三角形荷载 (峰值分别为 q_1, q_2, q_3) 与 1 个钢支撑轴力的集中荷载 (T_{c1}), 该基坑支护结构的桩体最大水平位移分别在其作用下所产生的桩体水平位移叠加求得, 工况 2 单支撑支护结构土压力分布如图 5 所示。

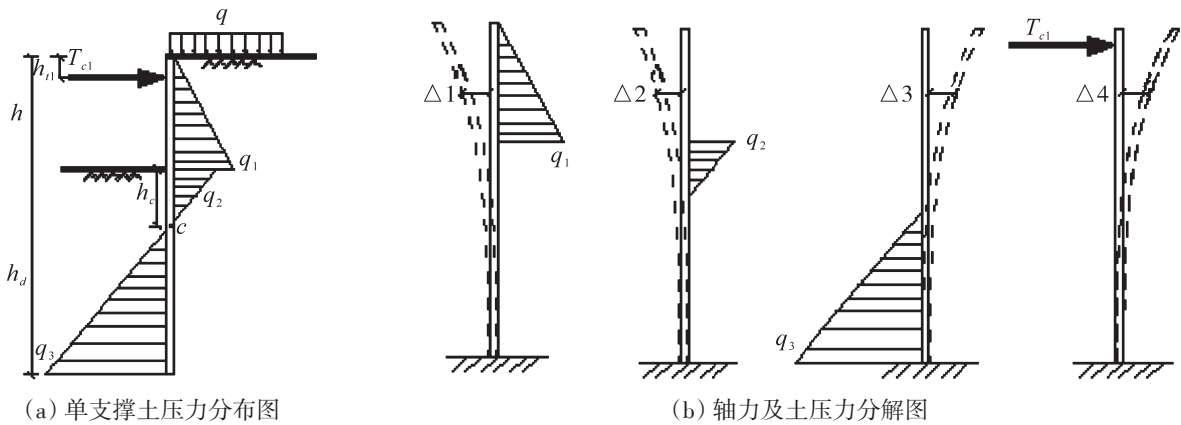


图 5 工况 2 单支撑支护结构土压力分布图

Fig 5 Condition 2 single support the distribution of earth pressure of retaining structure

可知^[10]

$$\Delta_1 = \frac{q_1 h}{72EI} \{18(h_d + \frac{h}{3})^2 l - 6(h_d + \frac{h}{3})^3 + \frac{28h^3}{45} - [18(h_d + \frac{h}{3})^2 + h^2]x + \frac{3x^5}{5h^2}\}$$

$$\Delta_2 = \frac{q_2 h_c}{72EI} \{18(h_d - \frac{h_c}{3})^2 l - 6(h_d - \frac{h_c}{3})^3 + (h + \frac{h_c}{3})h_c^2 + \frac{2h_c^3}{45} - [18(h_d - \frac{h_c}{3})^2 + h_c^2]x\}$$

$$\Delta_3 = \frac{q_3 c}{72EI} [18b^2 l - 6b^3 + ac^2 - \frac{2c^3}{45} - (18b^2 + c^2)x]$$

$$\Delta_4 = \frac{T_{c1}(l-h_{t1})^3}{6EI} \left[2 - \frac{3(x-h_{t1})}{l-h_{t1}} + \frac{(x-h_{t1})^3}{(l-h_{t1})^3} \right]$$

式中:为基坑地表至桩体最大水平位移处的距离, $x=4.5$ m; $a=l-\frac{h_d-h_c}{3}$, $b=\frac{h_d-h_c}{3}$, $c=h_d-h_c$, h_{t1} 为基坑地表至第一道支撑位置的距离, $h_{t1}=0.5$ m, T_{c1} 为架设第一道支撑轴力值, $T_{c1}=250$ kN, 其他参数同工况 1。因此, 桩体最大水平位移 $f=\Delta_1+\Delta_2-\Delta_3-\Delta_4$, 则极限状态方程 $Z=f_{\max}-f=30-(\Delta_1+\Delta_2-\Delta_3-\Delta_4)$ 。

同样按照前述的方法, 将上述公式编成 Matlab 语言程序, 经计算得出, $\beta=2.794\ 4 > \beta_0$, $P_f=0.26\%$ 。因此, 当基坑开挖至地表下 6 m 并施加第一道支撑时, 可靠度指标大于目标可靠度指标, 说明该阶段深基坑支护结构可靠度满足设计要求, 基坑是安全稳定, 同时此阶段施工实践也表明基坑工程是安全的。

3.3 其他工况支护结构可靠度分析

基坑开挖至坑底, 未架设第二道支撑, 桩体水平位移随着开挖深度的增加继续增大, 桩体最大水平位移发生在 6 m 处 (6.7 mm), 基坑支护型式还是单支撑支护结构。基坑开挖至坑底并架设第二道支撑, 由于时空效应桩体水平位移还有所增大, 桩体最大水平位移发生在 6 m 处 (8.25 mm), 基坑支护型式为双支撑支护结构。工况 3 和 4 支护结构可靠度详述如表 3 所示。

表 3 工况 3 和 4 支护结构可靠度分析

Tab 3 The working condition of 3 and 4 retaining structure reliability analysis

工况	支护结构状态	桩体最大水平位移	产生最大水平位移的位置	各参数情况
3	单支撑	$\Delta_1 + \Delta_2 - \Delta_3 - \Delta_4$	$x=6$ m	Δ_1 、 Δ_2 、 Δ_3 、 Δ_4 计算公式同工况 2 $h=13.5$ m $h_d=6$ m $x=6$ m $T_{c1}=250$ kN 其他参数同工况 1
4	双支撑	$\Delta_1 + \Delta_2 - \Delta_3 - \Delta_4 - \Delta_5$	$x=6$ m	Δ_1 、 Δ_2 、 Δ_3 、 Δ_4 计算公式同工况 2 $\Delta_5 = \frac{T_{c2}(l-h_{t2})^2}{6EI} (2l-3x+h_{t2})$ $h_{t2}=6.5$ m $x=6$ m $T_{c1}=250$ kN $T_{c2}=250$ kN 其他参数同工况 1

同样按照前述的方法, 将各公式编成 Matlab 语言程序, 经计算输出结果如表 4。

表 4 计算输出结果

Tab. 4 Calculate the output

工况	可靠度指标 β	失效概率 P_f
3	$\beta=1.230\ 3 < \beta_0$	$P_f=10.93\%$
4	$\beta=2.578\ 0 > \beta_0$	$P_f=0.50\%$

由表可知, 当基坑开挖至坑底, 未架设第二道支撑时, 只有第一道支撑作用的情况下, 该深基坑支护结构可靠度不足, 基坑不安全, 此阶段深基坑支护结构的失效概率大于给定的失效概率 P_{f0} , 为一个危险工况。因此, 在基坑开挖至坑底后, 应及时架设第二道支撑, 提高基坑支护结构的稳定性, 减少危险工况暴露时间, 保证基坑工程的安全。当基坑开挖至坑底并架设第二道支撑时, 可靠度指标大于目标可靠度指标, 说明该深基坑支护结构可靠度满足设计要求, 深基坑工程是安全的, 同时根据监测数据分析的结果也说明建立的 Monte Carlo 法深基坑支护结构桩体水平位移可靠度分析计算程序是合理、可靠的, 可为今后工程技术人员提供计算依据。

4 结论

1) 建立的 Monte Carlo 法深基坑支护结构桩体水平位移可靠度分析计算程序,运行速度快、计算精度较高,在基坑工程实践中的可操作性强;

2) 对基坑开挖施工各工况支护结构的可靠度进行了分析,分析结果与工程实际情况相符合,表明建立的桩体水平位移可靠度计算程序是合理的,同时也非常符合工程实际情况;

3) 由于土性参数等的随机性和变异性特征,采用可靠度指标作为评价深基坑支护结构的安全与否,非常符合工程实际。

参考文献:

- [1] 张钦喜,孙家乐,刘柯. 深基坑锚拉支护体系变形控制设计理论与应用[J]. 岩土工程学报, 1999,21(2):161-165.
- [2] 朱爱国,陈晓平. 深基坑桩撑支护结构可靠度分析[J]. 建筑结构, 1995(5):6-8.
- [3] 杨林德,徐超. Monte Carlo 模拟法与基坑变形的可靠度分析[J]. 岩土力学, 1999,20(1):15-18.
- [4] 黄艳,李惠强. 悬臂支护结构可靠性分析的遗传算法[J]. 华中科技大学学报, 2001,29(7):106-108.
- [5] 李志华,康海贵. 隧道初期支护结构可靠度计算方法研究[J]. 武汉理工大学学报, 2009,31(10):63-67.
- [6] 李雷雷. 基坑变形监测分析及单撑-排桩墙支护结构抗倾覆可靠度研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2012.
- [7] 黄志全,王安明,毕理毅,等. 深基坑支护工程可靠度分析与数值模拟[M]. 郑州: 黄河水利出版社,2009.
- [8] 王钊. 桩-锚杆支护结构可靠度研究[D]. 济南: 山东科技大学, 2010.
- [9] 廖琰. 深基坑支护结构抗倾覆破坏稳定可靠性分析[J]. 工程勘察, 2003(6):37-39.
- [10] 浙江大学. 建筑结构静力计算实用手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
- [11] 中华人民共和国行业标准. JGJ4-2008 建筑桩基技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.

Reliability Research for Supporting Structures of Deep Foundation Pit Based on Monte Carlo Method

Wan Zhihui, Liu Hongyan, Bu Yanjie, Zhang Xu

(School of Civil and Architectural Engineering, Liaoning University of Technology, Jinzhou 121001, China)

Abstract: On a certain tunnel construction monitoring data of foundation pit engineering is analyzed, it is concluded that, in the process of excavation of the pile-stay within a horizontal displacement of supporting of pile a with the change rule of the excavation depth. This kind of structure reliability index is presented and is established based on the Monte Carlo method for pile retaining structure of deep foundation pit horizontal displacement reliability analysis program. For the working condition of four construction of engineering cases are calculated respectively, the results show that the reliability calculation results agree with monitoring results, and good conformity.

Key words: deep foundation pit; bracing structure; monitoring data; Monte Carlo method; reliability analysis

(责任编辑 王建华 李萍)