

基坑围护结构增量计算法的改进

刘成禹^{1,2}, 陈淑云¹

(1. 福州大学 环境与资源学院, 福建 福州 350116; 2. 福州大学 地质工程福建省高校工程研究中心, 福建 福州 350116)

摘 要: 就围护桩(或围护墙)加内支撑这一基坑支护形式而言, 基于弹性地基梁理论的增量法是其围护结构内力和变形计算的常用方法。合理计算荷载增量是该方法实施的关键之一。目前, 该法的荷载增量主要由土压力增量和挖除土体弹性抗力释放的反力增量两部分组成。根据弹性地基梁和增量法的基本原理, 结合基坑施工过程, 综合分析得出: 荷载增量除上述两部分外, 还应包括开挖面以下土体因开挖面下降、水平抗力系数降低而引起的土体弹性抗力部分释放的反力增量; 开挖面以下围护桩(或围护墙)任意点的这部分反力增量等于该点在上一工况下的侧向位移与开挖侧土体水平抗力系数的比例系数 m 和本工况挖除土体厚度的乘积。工程实例理论计算结果和实测结果的对比分析表明, 与传统增量法相比, 采用改进增量法, 围护桩(或围护墙)侧向位移的计算值与实测值更加接近, 计算结果更加符合工程实际。

关 键 词: 基坑; 围护结构; 侧向位移; 增量法; 弹性抗力

中图分类号: TU 470

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598(2018)05-1834-06

Improvement of incremental calculation method of retaining structure for foundation pit

LIU Cheng-yu^{1,2}, CHEN Shu-yun¹

(1. College of Environment and Recourses, Fuzhou University, Fuzhou, Fujian, 350116, China;

2. Engineering Research Center for Geological Engineering of Fujian Provincial University, Fuzhou University, Fuzhou, Fujian, 350116, China)

Abstract: In terms of support form for foundation pit, the most common calculation method of internal force and displacement of retaining piles (or enclosure wall) plus internal bracings is incremental method, which is based on the theory of beam on elastic foundation. Reasonable calculation of load increment is the key to implement this method. At present, the load increment of this method mainly consists of earth pressure increment and reaction increment released by the excavated soil elastic resistance. Based on the basic principle of the method of beam on elastic foundation and incremental method, combined with excavation construction process, the following conclusions were drawn through the comprehensive analysis. In addition to the above two parts, the load increment also included reaction increment by soil elastic resistance released, which was partially caused by the decrease of the excavation face and the reduction of the horizontal resistance coefficient. The reaction increment of random point of the retaining piles (or enclosure wall) in this part that below the excavation face was equal to the product of the lateral displacement of this point in the previous working condition and the proportional coefficient of the soil horizontal resistance coefficient (m), and the excavated soil thickness in the current working condition. The comparative analysis of theoretical calculation results and measured results of engineering examples show that: compared with the traditional incremental method, utilizing the load increment mentioned in this paper to do load increment calculation (the improved incremental method) yields a value of lateral displacement of retaining piles (or enclosure wall) that is much closer to the measured value. The calculation result is more in line with the engineering practice.

Keywords: foundation pit; enclosure structure; lateral displacement; incremental method; elastic resistance

1 引 言

随着基础设施的大规模建设和城镇化进程的不断推进, 出现了大量的深基坑。在建筑密集地区,

基坑围护结构除了要保证基坑安全外, 还要能有效地控制基坑变形以保证周边建筑和环境的安全。采用适宜的方法, 准确地计算基坑围护结构的内力和变形是保证基坑安全和控制基坑变形的基础, 也是

基坑设计的重要内容之一^[1-2]。围护桩(或围护墙)加内支撑是建筑密集地区常用的基坑支护形式,基于弹性地基梁理论的杆系有限元法或弹性支点法是这类基坑围护结构内力和变形计算的常用方法之一^[1-5]。该法又可分为全量法和增量法^[1, 3-4]。

围护桩(或围护墙)加内支撑基坑围护结构内力和变形计算的增量法最早由杨光华等提出^[1, 6-7]。他们结合基坑工程实践的研究表明:增量法考虑了支撑架设前围护结构已变形的特点,可反映施工过程中对围护结构内力和变形的影响,计算结果符合工程实际^[1, 6-7]。增量法提出后,得到了广泛的运用,多位学者从理论和工程实践等方面对全量法和增量法进行了分析和比较。周运斌^[8]以某基坑工程为背景,按照施工阶段分别用增量法和全量法计算地下连续墙的受力和变形,并与实测值进行比较,得出增量法较为合理的结论。翟利华等^[9]运用最小势能原理对全量法和增量法进行了理论分析,从理论上解释了增量法考虑支撑架设前围护结构已发生一定变形的工程实际,符合施工过程,计算结果更加合理。以广州地铁某基坑为工程实例,通过计算结果与实测结果的对比分析,得出了增量法较为合理的结论。

准确地计算各工况下的荷载增量是增量法计算的关键^[1, 4, 10]。本文在基坑施工过程中荷载增量深入分析的基础上,分析目前增量算法在荷载增量计算中存在的不足,进而提出相应的改进计算方法,并通过工程实例验证改进方法的合理性。

2 荷载增量分析

采用增量法计算时,外荷载是从上一阶段施工到现阶段所产生的荷载增量^[1, 4, 6-7]。现有增量法的荷载增量主要由两部分组成^[1, 6-7, 11],即土压力增量和挖除土体弹性抗力的反力增量。

2.1 土压力增量

土压力增量为相近两个工况下围护桩(或围护墙)迎土侧土压力的差值。如图1所示,荷载增量①为工况2的土压力增量。其值为围护桩(或围护墙)迎土侧工况2的土压力减去工况1的土压力。

2.2 挖除土体弹性抗力的反力增量

挖除土体弹性抗力的反力增量为本工况挖除土体释放掉的水平弹性抗力。如图1所示,荷载增量②为工况2下开挖侧挖除土体弹性抗力的反力增量。其值为:工况1、工况2间挖除土体(图中AB高度)的水平抗力系数与该段围护桩(或围护墙)在工况1下的水平位移乘积。

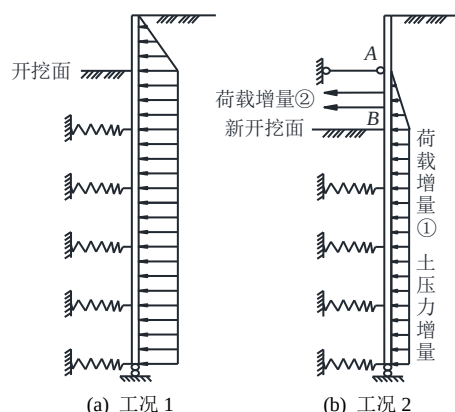


图1 传统增量法的荷载增量

Fig.1 Load increment of traditional incremental method

作者认为,增量法的荷载增量除了上述两部分外,还应考虑开挖面以下土体水平抗力系数因开挖面下降而降低,土体水平弹性抗力部分释放引起的反力增量。具体理由如下。

按照弹性地基梁的基本原理,土体的水平弹性抗力 f 按下式计算:

$$f = ky \quad (1)$$

式中: k 为土体的水平抗力系数(kN/m^3); y 为土体的水平位移(m)。

现行《建筑基坑支护技术规程》(JGJ120-2012)^[2]规定:开挖面以下基坑内侧任一深度土体的水平抗力系数 k_i 按下式计算:

$$k_i = m(Z - h_i) \quad (2)$$

式中: m 为水平抗力系数的比例系数(kN/m^4); Z 为计算点在地面下的深度(m); h_i 为计算工况下的基坑开挖深度(m)。

随着施工的进行,基坑开挖深度 h_i 增加,开挖面以下同一计算点(深度 Z 相同)按式(2)计算出的水平抗力系数 k_i 减小。相应地,按式(1)计算出的水平弹性抗力降低。这表明:开挖面以下土体对围护桩(或围护墙)的水平弹性抗力将随着开挖深度的增加而部分释放。根据增量法的基本原理,开挖侧土体释放的弹性抗力将作为反作用力施加在围护桩(或围护墙)上。

以图2所示开挖面以下靠近围护桩(或围护墙)的点 P 为例。工况1、工况2条件下该点土体的水平抗力系数 k_{p1} 、 k_{p2} 分别为

$$\text{工况 1: } k_{p1} = m(Z - h_1) \quad (3)$$

$$\text{工况 2: } k_{p2} = m(Z - h_2) \quad (4)$$

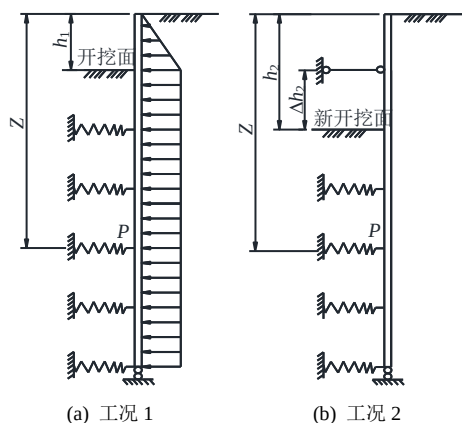


图2 开挖面以下土体水平抗力系数计算基准面变化示意图
Fig.2 Sketch of calculation data variation for horizontal resistance coefficient of the soil under excavated plane

设工况 1 时点 P 的水平位移为 y_{P1} , 则该点土体在工况 2 因开挖深度增加而释放的弹性抗力 Δf_{P2} 为

$$\Delta f_{P2} = (k_{P1} - k_{P2})y_{P1} = m(h_2 - h_1)y_{P1} = my_{P1} \cdot \Delta h_2 \quad (5)$$

式中: Δh_2 为工况 2 挖除土体的厚度 (m)。

更具一般性的, 开挖面以下靠近围护桩 (或围护墙) 的任意一点 P , 在工况 N 条件下, 因开挖深度增加而释放的弹性抗力 Δf_{PN} 为

$$\Delta f_{PN} = my_{P(N-1)} \cdot \Delta h_N \quad (6)$$

式中: $y_{P(N-1)}$ 为点 P 在工况 $N-1$ 的侧向位移 (m); Δh_N 为工况 N 挖除土体的厚度 (m)。

目前的增量算法中并没有考虑该部分反力。从弹性地基梁的基本原理、增量法的基本思想及基坑施工过程的上述分析可看出: 基于弹性地基梁理论的基坑围护结构增量算法中, 荷载增量还应包含开挖面以下土体因开挖深度增加、水平弹性抗力系数降低而引起的反力增量。

3 增量法的改进

本文第 2 部分的分析表明, 随着基坑开挖深度的增加, 基坑开挖侧土体水平弹性抗力的释放包括下列两部分:

(1) 本工况挖除土体释放的弹性抗力。这一部分现有增量算法中已考虑。

(2) 开挖面以下土体, 因开挖面下降、水平抗力系数降低而部分释放的弹性抗力。这一部分现有增量算法中尚未考虑。

如图 3 所示, 改进增量算法的荷载增量由 3 部分组成:

(1) 土压力增量。图 3(b)中的荷载增量①。

(2) 挖除土体弹性抗力的反力增量。图 3(b)中的荷载增量②。

(3) 开挖面以下土体因开挖面下降、水平抗力系数降低、弹性抗力部分释放引起的反力增量, 即图 3(b)中的荷载增量③。其值按下述方法计算: 基于弹性地基梁理论的围护结构内力和位移一般采用杆系有限元或弹性支点法求解^[1-2, 5, 12]。采用该法可计算出任一工况下, 围护桩 (或围护墙) 不同深度处的侧向位移。在此基础上, 按式 (6) 即可算出各工况开挖面以下任意深度处土体因开挖面下降、水平弹性抗力系数降低而释放的弹性抗力, 将其作为反力作用在围护桩 (或围护墙) 上即可。

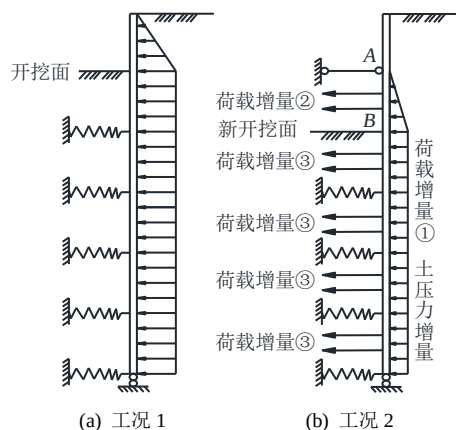


图3 改进后增量法的荷载增量

Fig.3 Load increments of improved incremental method

4 改进增量法合理性的验证

前文从理论上分析了传统增量法在荷载增量计算中需改进的地方。本部分将以具体工程为例, 分别用传统增量法和改进增量法计算围护桩的侧向位移, 通过计算结果与实测结果的对比分析, 验证改进增量法的合理性。

4.1 工程概况

成绵乐客运专线双流机场站 DK176+594~+730 段基坑围护结构由围护桩和 4 道内支撑组成。围护桩为 C30 钢筋混凝土灌注桩, 桩径为 1.5 m, 桩距为 1.8 m; 内支撑由两道 C30 钢筋混凝土支撑 (第 1、2 道) 和两道钢管支撑 (第 3、4 道) 组成。该区段地表平坦, 土层界面接近水平, 断面相差无几。典型横断面如图 4 所示。

基坑深度范围内土层由上至下依次为人工填土、成都黏土和卵石土。各层土的物理力学参数见表 1。

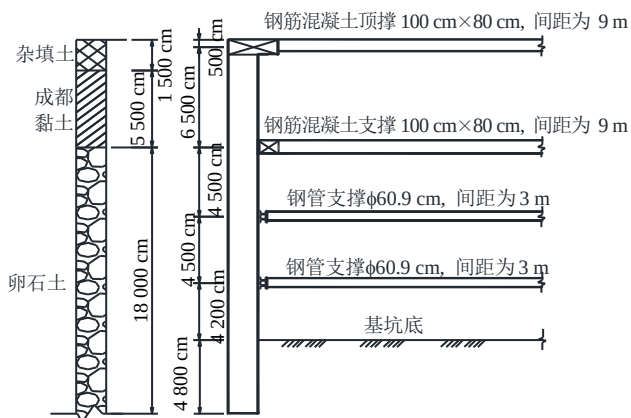


图4 基坑典型断面图

Fig.4 Typical cross section of foundation pit

表1 土层的物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of soils

地层	重度 /(kN/m ³)	黏聚力 /kPa	内摩擦角 /(°)	层厚 /m
杂填土	19.8	20.0	12.0	1.5
成都黏土	19.8	20.0	12.0	5.5
卵石土	21.0	0.0	45.0	22.5

基坑开挖前进行降水，降水后基坑内稳定地下水位在坑底以下 0.5~1.0 m。基坑施工主要工况的基本情况见表 2。

表2 DK176+594~+730 段基坑的主要工况

Table 2 Main working conditions of foundation pits from section DK176+594 to DK176+730

工况 编号	工况说明
1	施作第 1 道支撑后，开挖至第 1 道支撑顶面以下 7.0 m
2	施作第 2 道支撑后，开挖至第 1 道支撑顶面以下 11.5 m
3	架设第 3 道支撑后，开挖至第 1 道支撑顶面以下 16.0 m
4	架设第 4 道支撑后，开挖至第 1 道支撑顶面以下 20.2 m

第 3、4 道支撑（钢支撑）架设后施加 10 kN 的预加力。该预加力的施加主要是使钢支撑端部与腰梁密贴，以便钢支撑架设后即时发挥作用并防止其滑落。

4.2 计算结果对比分析

现行《建筑基坑支护技术规程》(JGJ120-2012)^[2]规定：当只取单根围护桩进行计算时，围护桩承受土压力的宽度为 1 倍桩间距；对圆形桩，开挖面以下土抗力的计算宽度按 $b_0 = 0.9 \times (1.5d + 0.5)$ 计算，并取计算值与桩间距的较小值。本算例中，桩径 $d = 1.5$ m，桩间距为 1.8 m，土抗力的计算宽度 $b_0 = 0.9 \times (1.5d + 0.5) = 2.3$ m，大于桩间距，所以，计算宽度 $b_0 = 1.8$ m。

该规程^[2]还规定：土体水平抗力系数的比例系数 m 宜按桩的水平荷载试验及地区经验取值，缺少试验和经验时，按经验公式计算。本例基坑附近单桩水平荷载试验得到的 $m = 33$ MN/m⁴，该值与经验公式计算结果（ $m = 36$ MN/m⁴）相差不大。计算时 m 取 33 MN/m⁴。

对水平对撑，当支撑腰梁或冠梁的挠度可忽略不计时，计算宽度内弹性支点刚度系数 K_R 按下式计算^[2]：

$$K_R = \frac{\alpha_R EA b_0}{\lambda L S} \quad (7)$$

式中： α_R 为与支撑松弛有关的系数，取 $\alpha = 0.8 \sim 1.0$ ； E 为支撑构件材料的弹性模量 (MPa)； A 为支撑构件断面面积 (m²)； L 为支撑构件受压计算长度 (m)； S 为支撑水平间距 (m)； λ 为支撑不动点调整系数，当支撑两对边基坑的土性、深度、周边荷载等条件相近且分层对称开挖时，取 $\lambda = 0.5$ 。

双流机场站 DK176+594~+730 段基坑的冠梁、支撑腰梁均采用 C30 钢筋混凝土且外侧与围护桩密贴，自身的挠曲变形很小，可忽略不计。该段基坑虽然宽达 55.2 m，但每道支撑下架设 4 根格构柱，格构柱与支撑间联结紧密，很好地限制了支撑的挠曲变形。现场监测结果也表明，支撑的挠曲变形很小。所以，可以采用式 (7) 计算各道支撑的弹性支点刚度系数 K_R 。

本基坑两对边的土性、深度、周边荷载等条件相近，且采用分层对称开挖，按规定取 $\lambda = 0.5$ 。考虑到支撑较长，钢筋混凝土支撑、钢支撑的支撑松弛系数 α_R 分别取 0.9、0.8。

根据支撑的材料参数、截面尺寸、间距等按式 (7) 可计算出钢筋混凝土支撑（第 1、2 道）和钢支撑（第 3、4 道）的水平刚度系数 K_R 。参数及计算结果见表 3。

表3 支撑水平刚度系数 K_R 计算结果Table 3 Calculating results of horizontal stiffness coefficient of bracing K_R

参数	α_R	E / GPa	A / m ²	L / m	S / m	b_0 / m	K_R /(MN/m)
钢筋混凝土支撑	0.9	31	0.800 0	55.2	9.0	1.8	161.74
钢管支撑	0.8	210	0.029 8	55.2	3.0	1.8	108.83

表 1 参数按《建筑基坑支护技术规程》(JGJ120-2012) 相关规定可计算不同工况下的土压力及其增量。在此基础上，根据上述 b_0 、 m 、 K_R 等参数，采用弹性支点法，分别按传统增量法和改进增量法对

表 2 所列 4 种工况下围护桩的侧向位移进行计算。

在本段基坑 DK176+600~720 各断面的围护桩内埋设测斜管, 采用测斜仪对施工过程中围护桩不

同深度处的侧向位移进行了监测。表 2 所列 4 个工况下围护桩侧向位移实测结果及传统增量法、改进增量法的计算结果如图 5 所示。由图可看出:

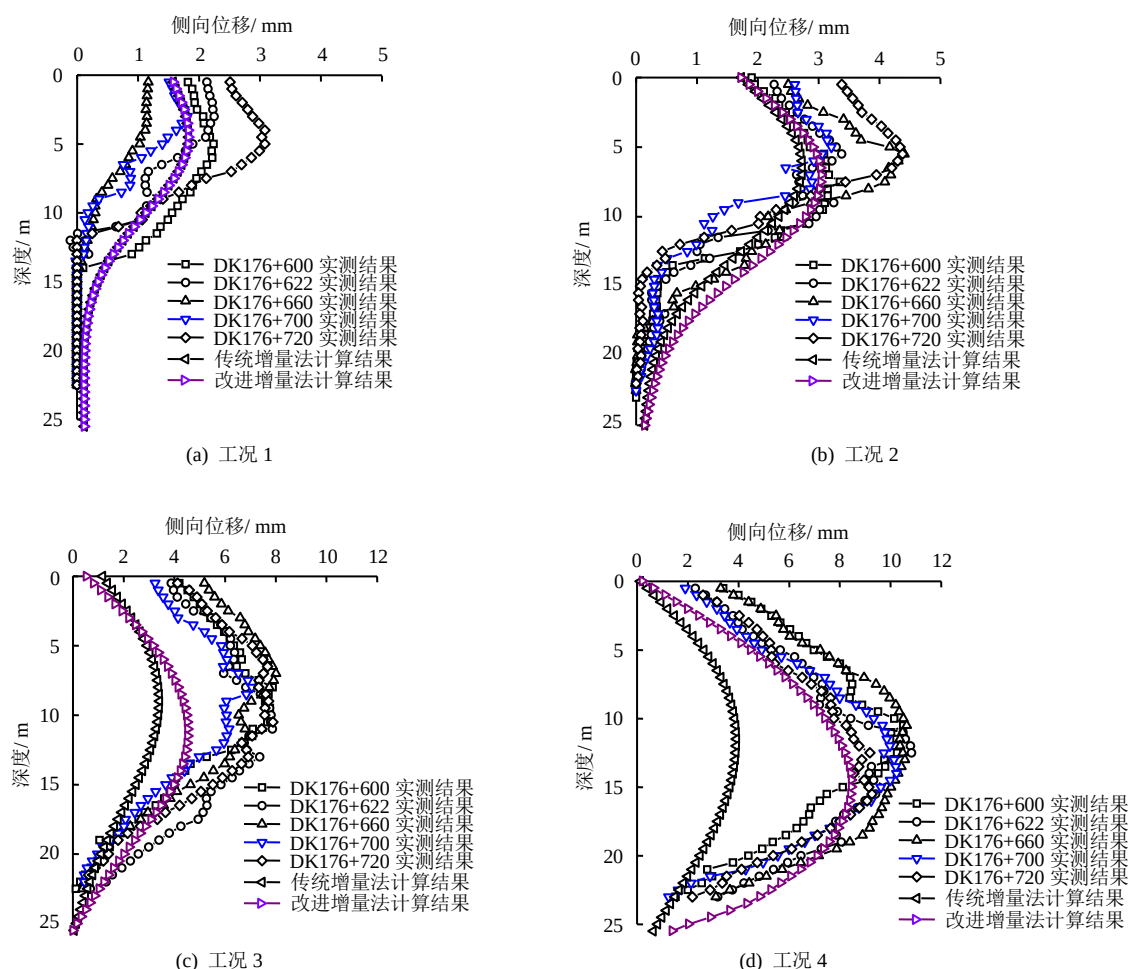


图 5 围护桩侧向位移

Fig.5 Lateral displacements of retaining pile

(1) 工况 1 下, 传统增量法和改进增量法计算得出的围护桩侧向位移相同, 两条位移曲线重叠。这是因为: 工况 1 的前一工况, 基坑未开挖, 开挖面以下围护桩的侧向位移为 0, 按式 (6) 计算出的改进增量法中额外考虑的反力增量为 0, 传统增量法和改进增量法的荷载增量相同, 所以两者的计算结果一致。

(2) 4 个工况下, 按传统增量法和改进增量法计算得出的围护桩侧向位移曲线形态、位移最大值出现部位总体上与实测结果接近。这说明, 传统增量法和改进增量法计算结果均可较好地反映施工过程中围护桩 (或围护墙) 侧向位移的基本规律。

(3) 工况 2、3、4 下, 改进增量法的计算结果更加接近实测结果。传统增量法计算出的围护桩侧向位移均比改进增量法小, 工况越靠后, 两种方法

计算出的围护桩侧向位移差值越大。这说明, 改进增量法的计算结果更加接近工程实际, 传统增量法的计算偏差会随着基坑开挖深度的增加而增大。

结合承担的项目, 作者分别用传统增量法和改进增量法, 对采用明挖暗埋法施工的成绵乐客运专线双流机场隧道基坑工程中围护结构为排桩+内支撑的其他区段也进行了类似计算, 并与实测结果对比。上述研究结果表明, 改进增量法的计算结果更加接近实测值; 传统增量法计算出的围护桩侧向位移比改进增量法的小, 工况越靠后 (开挖深度越大), 两者间的差值越大。

与传统增量法相比, 改进增量法的计算结果除了可较好地反映围护桩 (或围护墙) 侧向位移的基本规律外, 数值上也与实测值更加接近。这也验证了在围护结构内力和位移的增量算法中, 考虑本

文所述荷载增量的必要性和改进方法的合理性。

5 结 论

针对围护桩(或围护墙)加内支撑这一基坑支护形式围护结构内力和位移计算的增量法,从荷载增量的角度进行了理论分析和实例验证,得出如下结论:

(1) 基于弹性地基梁理论的基坑围护结构增量计算法中,荷载增量还应包括开挖面以下土体因开挖面下降、水平抗力系数降低、土体弹性抗力部分释放引起的反力增量。

(2) 开挖面以下围护桩(或围护墙)上任意点因开挖面下降、水平抗力系数降低而引起的反力增量等于该点在上一工况下的侧向位移与土体水平抗力系数的比例系数 m 和本工况挖除土体厚度的乘积。

(3) 与传统增量法相比,在荷载增量中考虑本文所述的开挖面以下土体因开挖面下降、水平抗力系数降低、土体弹性抗力部分释放引起的反力增量后(改进增量法),围护桩(或围护墙)侧向位移的计算结果更加接近工程实际。

参 考 文 献

- [1] 刘国彬,王卫东. 基坑工程手册(第二版)[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
LIU Guo-bin, WANG Wei-dong. Foundation ditch engineering handbook (Version 2)[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2009.
- [2] 中国建筑科学研究院. JGJ120-2012 建筑基坑支护技术规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
China Academy of Building Research. JGJ120-2012 Technical specification for retaining and protection of building foundation excavations[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2012.
- [3] 王洪新,孙玉永. 考虑基坑开挖宽度的杆系有限元算法及试验研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(9): 2781-2795.
WANG Hong-xin, SUN Yu-yong. Test study and bar system FEM for foundation pits considering excavation width[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2012, 33(9): 2781-2795.
- [4] 冯世进,陈晓霞,高广运,等. 迭代增量法分析地下连续墙的受力性状[J]. 岩土力学, 2009, 30(1): 226-230.
FENG Shi-jin, CHEN Xiao-xia, GAO Guang-yun, et al. Analysis of underground diaphragm wall by iterative incremental method[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(1): 226-230.
- [5] 张强勇. 弹性地基梁杆系有限元法在深大基坑工程支护设计中的应用[J]. 建筑结构学报, 2005, 26(3): 114-117.
ZHANG Qiang-yong. Application of bar system FEM for beam on elastic foundation in supporting design for a deep and large foundation pit engineering[J]. **Journal of Building Structures**, 2005, 26(3): 114-117.
- [6] 杨光华,陆培炎. 深基坑开挖中考虑施工过程的多支撑或多锚地下连续墙的增量算法[J]. 建筑结构, 1994, (8): 28-47.
YANG Guang-hua, LU Pei-yan. The incremental calculation method for the diaphragm wall with multi-brace or multi-anchor in deep excavation[J]. **Building Structure**, 1994, (8): 28-47.
- [7] 杨光华. 深基坑支护结构的实用计算方法及其应用[J]. 岩土力学, 2004, 25(12): 1885-1896.
YANG Guang-hua. Practical calculation method of retaining structures for deep excavations and its application[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 25(12): 1885-1902.
- [8] 周运斌. 增量法在深基坑支护结构计算中的应用[J]. 地下空间, 1999, 19(1): 40-46.
ZHOU Yun-bin. A talk on application of incremental method in calculation of support structure of deep foundation[J]. **Underground Space**, 1999, 19(1): 40-46.
- [9] 翟利华,李德建,胡端前. 深基坑支护结构的计算理论及应用[J]. 四川建筑, 2007, 27(4): 75-77.
ZHAI Li-hua, LI De-jian, HU Duan-qian. Calculation theory and application for support structure of deep foundation[J]. **Sichuan Architecture**, 2007, 27(4): 75-77.
- [10] 陈玉香. 增量法在深基坑围护结构水平变形计算中的应用[J]. 宁波大学学报(理工版), 2011, 24(3): 76-79.
CHEN Yu-xiang. Application of incremental method in deep excavation enclosure structure horizontal displacement calculation[J]. **Journal of Ningbo University (Natural Science and Engineering Edition)**, 2011, 24(3): 76-79.
- [11] 张玉成,杨光华,钟志辉,等. 软土基坑设计若干关键问题探讨及基坑设计实例应用分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(11): 2334-2343.
ZHANG Yu-cheng, YANG Guang-hua, ZHONG Zhi-hui, et al. Discussion on some key problems in soft soil foundation pit design and application analysis of design examples[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2012, 31(11): 2334-2343.
- [12] 陈林靖,戴自航. 深基坑内撑式支护结构计算的综合刚度和双参数法[J]. 岩土力学, 2010, 31(3): 891-895.
CHEN Lin-jing, DAI Zi-hang. Composite stiffness and biparameter method for analyzing retaining structures of deep foundation pits with internal braces[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(3): 891-895.