

Analysis and Application of Internal Force and Deformation of Herringbone Bracing Structure

Jie Liu, Xin Luo, Wei Zhou, Sidun He

College of Civil Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan
Email: 2860557969@qq.com

Received: Nov. 21st, 2019; accepted: Dec. 10th, 2019; published: Dec. 17th, 2019

Abstract

On the basis of summarizing, analyzing and sorting out the characteristics of double-row pile supporting structure, the subject group puts forward the herringbone supporting structure, which is a new form of deep foundation pit supporting structure. In this paper, based on the basic idea of Winkler foundation beam, the vertical friction effect between row piles and soil and the space effect are neglected, and the friction effect between inclined reinforced cement-soil Wall and soil is considered. The plane finite element model of herringbone bracing structure considering pile-soil effect is established, and the global stiffness Matrix of herringbone bracing structure is constructed, and the corresponding Matlab Program is compiled. The analysis of internal force and deformation is carried out through an engineering case. The results show that the calculated displacement is consistent with the measured displacement, and the internal force is regular and comparable, which can be used as a reference for the design of herringbone bracing structure.

Keywords

Herringbone Support Structure, Finite Element Method, Winkler Foundation, Elastic Resistance Coefficient

人字形支护结构内力与变形分析及应用

刘杰, 罗鑫, 周伟, 贺斯顿

湖南工业大学土木工程学院, 湖南 株洲
Email: 2860557969@qq.com

收稿日期: 2019年11月21日; 录用日期: 2019年12月10日; 发布日期: 2019年12月17日

摘要

课题组在归纳、分析和整理双排桩支护结构特点的基础上,提出了人字形支护结构,它作为一种全新的深基坑支护结构形式,目前尚无简单而有效的设计计算方法。本文基于Winkler地基梁的基本思想,在忽略排桩与土竖向摩擦效应及空间效应下,考虑斜向加筋水泥土墙与土的摩擦作用,建立了考虑桩土效应的人字形支护结构平面杆系有限元模型,构建了人字形支护结构工作性状分析的整体刚度矩阵,编制了相应的Matlab计算程序,并通过工程案例进行了内力及变形分析。工程计算结果表明,计算位移与监测位移具有较好的一致性,计算内力有较好的规律性和可比性,可供人字形支护结构设计参考。

关键词

人字形支护结构, 有限元法, Winkler地基, 弹性抗力系数

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

因双排桩具有空间刚度大、可调性强、适用于复杂多变的场地条件,是深基坑常用的一种支护方式,该支护结构包括前排桩、后排桩及连接前、后排桩的连梁,其作用机制主要是通过连梁发挥空间效应,并与桩土协同工作,支挡基坑开挖引起的不平衡土压力,达到保持坑壁稳定、控制变形、满足施工和相邻环境安全要求。目前,双排桩支护结构的设计计算方法大致可分为极限平衡法[1][2]、数值算法[3][4][5]、弹性抗力法[6][7][8]。课题组在总结双排桩支护结构优缺的基础上,提出了人字形支护结构,且应用于工程实践,取得了良好的经济及社会效益。目前对于集挡土、止水与锚固、托换与隔离功能于一体的人字形支护结构内力及变形分析的研究未见文献报道。本文基于Winkler地基梁的基本思想,考虑斜向加筋水泥土墙与土的摩擦阻力,建立了考虑桩土效应的人字形支护结构平面杆系有限元模型,构建了人字形支护结构工作性状分析的整体刚度矩阵,编制了相应的程序,且依托工程案例进行了内力及变形计算。

2. 人字形支护结构的构造及优点

人字形支护结构的构造是:由钢筋混凝土排桩和与排桩桩顶冠梁或桩顶连接的斜向加筋水泥土地下连续墙锚体组成,即在钢筋混凝土悬臂桩支护结构的后面施工一定厚度,且倾角较大(500~700)的斜向加筋水泥土地下连续墙锚体提供抗拔力,并将锚体与排桩桩顶冠梁或桩顶进行可靠连接的一种组合式深基坑支护结构,如图1所示。斜向加筋水泥土地下连续墙的成型可采用高压旋喷桩、水泥土搅拌桩、注浆水泥土桩成型,其加筋体可以插入型钢或钢绞线或变形钢筋。为提高插入的钢绞线或变形钢筋抗拔力,可在加筋体端部设置锚(碇)板。

人字形支护结构的优点:该支护技术在软土或松散填土等富水场地深基坑支护中有着巨大的优越性,它在降低基坑开挖对周边环境的影响,有效控制支护结构的变形及周边地面沉降中具有很好的效果,具体如下:

1) 稳定性好。斜向加筋水泥土地下连续墙锚体与钢筋混凝土排桩形成空间支护结构,增强了墙后土体稳定性,能很好控制基坑变形。

2) 支护能力强。斜向加筋水泥土地下连续墙锚体的抗拔力由地下连续墙与土的摩擦阻力和地下连续墙自重组成。由于地下连续墙自重大,且其侧面与土接触的面积大,摩擦阻力大,因此,斜向加筋水泥

土地下连续墙锚体能提供比普通锚杆高很多的抗拔力。

3) 集挡土、止水与锚固、托换与隔离功能于一体。斜向加筋水泥土地下连续墙既有挡土功能，又有止水功能，还兼有锚杆功能，同时，对邻近基坑的坡顶建(构)筑物还有托换及隔离作用。

4) 控制支护结构变形及周边地面沉降能力强。因斜向加筋水泥土地下连续墙的斜向支承及遮拦作用，致使作用在钢筋混凝土排桩上的土压力降低，减少了支护结构的变形及桩身内力，并且还可以通过对加筋体施加合适的预应力来控制支护结构的变形及地面沉降。

5) 坑底抗隆起稳定性强。因斜向加筋水泥土地下连续墙的存在，一方面提高了可能发生的滑动面上的抗剪能力；另一方面从整体上提高了坑外土体的压缩模量等土性指标，起到了加固坑外土体的作用，从而提高了基坑的抗隆起稳定性。

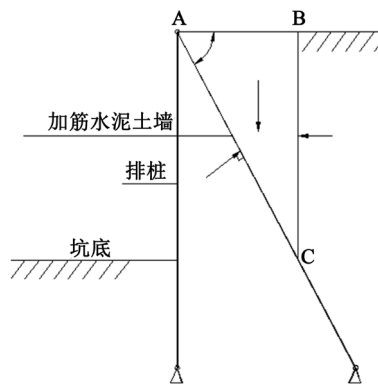


Figure 1. Simplified diagram for calculation of earth pressure
图 1. 土压力计算简图

3. 人字形支护结构平面有限元模型

3.1. 基本假定

- 1) 忽略排桩与土的竖向摩擦效应及空间效应，假设人字形支护结构为平面杆件体系；
- 2) 假设排桩桩底及斜向加筋水泥土地下连续墙墙底为铰支或固支；斜向加筋水泥土地下连续墙加筋体与桩顶的连接为铰接或刚接；
- 3) 将坑底以下排桩及斜向加筋水泥土地下连续墙的嵌固段视为弹性地基梁(如图 2 所示)。

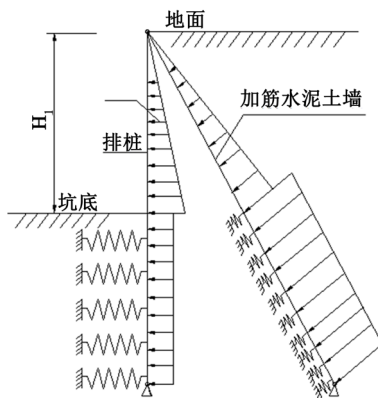


Figure 2. Finite element mechanical model of herringbone bracing structure
图 2. 人字形支护结构平面杆系有限元力学模型

3.2. 土压力确定

1) 墙后土体作用在墙上的土压力

根据朗金土压力理论可得作用在坑底以上假想墙背 BC 上(如图 1 所示)的土压力强度及总的土压力分别为:

$$\sigma_a = \gamma z K_a - 2c\sqrt{K_a} \quad (1)$$

$$E_a = \frac{1}{2}(\gamma H_1 K_a - 2c\sqrt{K_a}) H_1 \quad (2)$$

式中: $K_a = \tan^2(45 - \varphi/2)$ 为主动压力系数; z 为计算点深度(m); c, φ 分别为坑底以上墙后土的黏聚力(kPa)和内摩擦角($^\circ$), γ 为墙后土的重度(kN/m³); H_1 为基坑开挖深度(m)。

为求得坑底以上作用在斜向加筋水泥土地下连续墙的土压力, 偏于安全地假设斜向加筋水泥土地下连续墙与土的接触面光滑, 则土压力计算简图如图 1 所示。取墙后土体 ABC 为研究对象, 由平衡条件可得坑底以上作用在斜向加筋水泥土地下连续墙上总的土压力为:

$$E_a = \frac{1}{2\sin\alpha}(\gamma H_1 K_a - 2c\sqrt{K_a}) H_1 \quad (3)$$

式中: α 为斜向加筋水泥土地下连续墙与水平面的夹角($^\circ$)。

随着基坑开挖深度的增加, 人字形支护结构前后不平衡土压力增加, 人字形支护结构及桩墙之间的土体将类似于俯斜式挡土墙向基坑开挖侧移动。结合相关土压力分布规律研究, 作用在人字形支护结构的整体土压力可按以下分布形式确定, 坑底以上的土压力 $\sigma_{a1} + \sigma_{b1}$ 呈三角形分布, 最大值在坑底, 坑底至墙底土压力 σ_{b2} 呈矩形分布。由(3)可推得坑底以上及以下作用在斜向加筋水泥土地下连续墙的法向土压力强度分别为:

$$\sigma_{a1} + \sigma_{b1} = \gamma z K_a - 2c\sqrt{K_a} \quad (4)$$

$$\sigma_{b2} = \gamma H_1 K_a - 2c\sqrt{K_a} \quad (5)$$

式中: σ_{a1} 为墙后土压力通过桩墙土体传递于坑底以上排桩上的土压力(kPa); σ_{b1} 为作用于坑底以上斜向加筋水泥土地下连续墙上的法向土压力(kPa); σ_{b2} 为作用于坑底以下斜向加筋水泥土地下连续墙上的法向土压力(kPa), 如图 2 所示。

基坑开挖后, 在斜向加筋水泥土地下连续墙上的土压力作用下, 由于坑底以下桩墙之间距离较大, 水泥土墙后土压力通过桩墙之间土体的传递作用弱, 因此, 坑底以下不考虑水泥土墙后土压力传递给排桩。由于坑底以上桩墙之间的距离较近, 桩墙间的土体会将水泥土墙后土压力传递给排桩, 对排桩而言是倾覆力矩, 对斜向加筋水泥土地下连续墙而言是抗侧移土压力。假设排桩上的土压力 σ_{a1} 及斜向加筋水泥土地下连续墙上的土压力 σ_{b1} 按下式对整体主动土压力($\gamma z K_a - 2c\sqrt{K_a}$)进行分配[8]

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{a1} &= K_1 (\gamma z K_a - 2c\sqrt{K_a}) \\ \sigma_{b1} &= K_2 (\gamma z K_a - 2c\sqrt{K_a}) \\ K_1 + K_2 &= 1 \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式中: K_1, K_2 分别为坑底以上考虑土压力传递效应的排桩桩背及斜向加筋水泥土地下连续墙墙背土压力分配系数。

分配系数 K_1 按如下方法确定[8]。见图 3, 桩墙间土体以排桩 E 点为滑动起点, 坑底面以上桩墙间土体在重力作用下对滑动点 E 产生的抗滑力矩为 M_E ; 由于受后排桩阻挡, 墙后滑动面内土体以 C 点为滑

动起点, 墙后滑动面内土体在重力作用下对滑动点 C 产生的抗滑力矩为 M_C 。 M_E 与 M_C 一起组成土体的总抗滑动力矩 M 。分配系数 K_1 定义为抗滑力矩 M_E 与总抗滑力矩 M 之比, 整理得分配系数 K_1 为:

$$\left. \begin{aligned} K_1 &= \frac{M_E}{M} = \frac{b^2}{H_1^2 \tan^2 \phi_D} \\ \phi_D &= 2 \left\{ 45^\circ - \arctan \left[\tan \left(45^\circ - \frac{\phi}{2} \right) - \frac{2c}{\gamma H_1} \right] \right\} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式中: ϕ_D 为水泥土墙后土体等效内摩擦角($^\circ$), 对于黏性土, 按式(7)中第 2 式计算。

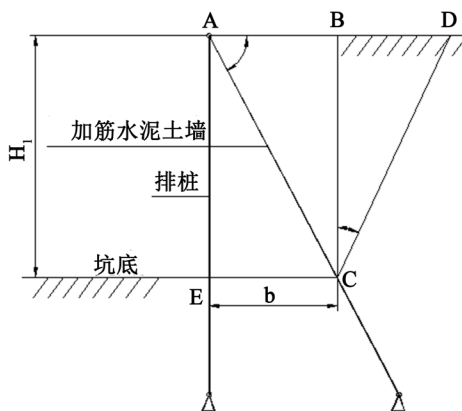


Figure 3. Diagram of distribution coefficient calculation
图 3. 分配系数计算简图

2) 桩墙之间土体作用在排桩上的土压力

基于排桩和斜向加筋水泥土地下连续墙对桩墙之间土体的约束, 近似将桩墙之间的土体视为侧限条件下无限长弹性土体, 则作用在排桩上的土压力为[9] $\sigma = \mu \gamma_1 z / (1 - \mu)$ 。式中: μ 、 γ_1 分别为桩墙之间土的泊松比及重度(kN/m^3); z 为计算点深度(m)。同时, 假设桩墙之间的土体作用于基坑开挖面以上排桩上的土压力为三角形分布, 即坑底处的土压力强度为 $p_1 = \mu \gamma_1 H_1 / (1 - \mu)$; 桩墙之间的土体作用在坑底以下排桩上的土压力为矩形分布, 其土压力强度为 $p_1 = \mu \gamma_1 H_1 / (1 - \mu)$ (如图 2 所示)。

3.3. 斜向水泥土墙与土的侧摩擦阻力确定

斜向加筋水泥土地下连续墙侧摩擦阻力采用桩土界面传递函数法来考虑, 将斜向水泥土墙划分成若干单元, 每一单元与土体之间用非线性弹簧联系, 以模拟斜向水泥土墙与土之间的摩擦特性。这些非线性弹簧的应力-应变关系就是墙侧摩擦阻力 τ 与剪切位移 s 间的关系。本模型的传递函数采用 Kezdi 形式, 其表达式为[10]

$$\tau(z) = K \gamma z \tan \varphi \left[1 - \exp \left(-\frac{ks}{s_u - s} \right) \right] \quad (8)$$

式中: $K = 1 - \sin \varphi'$ 为土的侧压力系数; φ' 、 γ 分别为土的有效内摩擦角($^\circ$)及土的重度(kN/m^3); k 为与土的类别及密实度有关的系数。 s_u 为墙侧摩擦阻力充分发挥时的临界位移, 根据墙侧土的情况, 可取 3~6 mm。

3.4. 人字形支护结构平面杆系有限元力学模型及计算实现

根据前述的分析可得作用在坑底以上及以下斜向加筋水泥土地下连续墙上的法向土压力分别为 σ_{b1}

和 σ_{b2} ；作用在坑底以上及以下排桩上的土压力分别为 $\sigma_{a1} + \sigma$ 及 p_1 。基于前述的假定可得人字形支护结构平面杆系有限元力学模型如图 2 所示。

1) 排桩及水泥土墙的刚度矩阵

建立刚度矩阵时，不考虑排桩桩侧摩擦作用，只考虑斜向水泥土墙的侧摩擦阻力。将排桩及斜向水泥土墙划分为 m 个单元，基于结构力学中的矩阵位移法，可获得排桩及斜向水泥土墙的单元刚度矩阵分别为：

$$k_p^e = \begin{bmatrix} 12EI/l^3 & 6EI/l^2 & -12EI/l^3 & 6EI/l^2 \\ 6EI/l^2 & 4EI/l & -6EI/l^2 & 2EI/l \\ -12EI/l^3 & -6EI/l^2 & 12EI/l^3 & -6EI/l^2 \\ 6EI/l^2 & 2EI/l & -6EI/l^2 & 4EI/l \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$k_w^e = \begin{bmatrix} EA/l & 0 & 0 & -EA/l & 0 & 0 \\ 0 & 12EI/l^3 & 6EI/l^2 & 0 & -12EI/l^3 & 6EI/l^2 \\ 0 & 6EI/l^2 & 4EI/l & 0 & -6EI/l^2 & 2EI/l \\ -EA/l & 0 & 0 & EA/l & 0 & 0 \\ 0 & -12EI/l^3 & -6EI/l^2 & 0 & 12EI/l^3 & -6EI/l^2 \\ 0 & 6EI/l^2 & 2EI/l & 0 & -6EI/l^2 & 4EI/l \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中： E 为桩身或墙身材料弹性模量(MPa)； I 为桩或墙的截面惯性矩(m^4)； l 为单元长度(m)， A 为水泥土墙单位长度的面积(m^2/m)。

由结构力学可知，单元节点力与节点位移之间的关系为：

$$\{f\}_i = [k_b^e]_i \{w\}_i \quad (11)$$

式中：对于排桩： $\{f\}_i = \{V_{j-1} \ M_{j-1} \ V_j \ M_j\}_i^T$ 为第 i 单元的节点力列阵；

$\{w\}_i = \{w_{j-1} \ \theta_{j-1} \ w_j \ \theta_j\}_i^T$ 为第 i 单元节点位移列阵；

对于水泥土墙： $\{f\}_i = \{U_{j-1} \ V_{j-1} \ M_{j-1} \ U_j \ V_j \ M_j\}_i^T$ 为第 i 单元的节点力列阵；

$\{w\}_i = \{u_{j-1} \ w_{j-1} \ \theta_{j-1} \ u_j \ w_j \ \theta_j\}_i^T$ 为第 i 单元节点位移列阵。 $[k_b^e]$ 对应排桩或水泥土墙的单元刚度矩阵。

对坑底以下排桩及斜向加筋水泥土地下连续墙的嵌固段视为弹性地基梁，将排桩或水泥土墙与地基的接触面也相应划分为 m 个子域，各子域的地基反力可视为均匀分布，则每个单元上的地基反力的合力为：

$$R_j = K_j w_j \quad (12)$$

式中： $K_j = lb$ 为排桩或水泥土墙与地基接触面积上的集中变基床系数； b 为排桩或墙的计算宽度。

利用单元节点的位移连续性条件及节点力平衡条件，由式(11)可得排桩或水泥土墙的整体刚度方程为：

$$\{F\} = [K_B] \{w\} \quad (13)$$

式中：对于排桩： $\{F\} = \{F_1 \ F_{M1} \ \dots \ F_m \ F_{Mm}\}^T$ ， $\{w\}_i = \{w_1 \ \theta_1 \ \dots \ w_m \ \theta_m\}^T$ ；

对于水泥土墙： $\{F\} = \{F_{N1} \ F_1 \ F_{M1} \ \dots \ F_{Nm} \ F_m \ F_{Mm}\}^T$ ， $\{w\} = \{u_1 \ w_1 \ \theta_1 \ \dots \ u_m \ w_m \ \theta_m\}^T$ ；

$[K_B]$ 对应排桩或水泥土墙的整体刚度矩阵。

2) 地基刚度方程

在土压力作用下排桩或墙节点有位移和转角, 根据接触条件, 地基中相应的节点也应考虑沉降和转角。但弹簧与排桩或墙接触处只能承担反力 $R_j = K_j s_j$, 而不能抵抗转动, 因此, 基底反力偶 $R_{mj} = 0$ 。由此可得地基的整体刚度方程为:

$$\{R\} = [K_s] \{s\} \quad (14)$$

式中: $[K_s]$ 对应于排桩或水泥墙的地基刚度矩阵。

对于排桩的地基: 其节点力和节点位移列阵分别为:

$$\{R\} = \{R_1, R_{M1}, \dots, R_m, R_{Mm}\}^T, \quad \{s\} = \{s_1, \theta_1, \dots, s_m, \theta_m\}^T;$$

对水泥土墙的地基: 其节点力和节点位移列阵分别为:

$$\{R\} = \{N_1, R_1, R_{M1}, \dots, N_m, R_m, R_{Mm}\}^T, \quad \{s\} = \{u_1, s_1, \theta_1, \dots, u_m, s_m, \theta_m\}^T$$

3) 排桩或斜向加筋水泥土地下连续墙与地基相互作用的整体刚度方程

对于坑底以下视为弹性地基梁的排桩及斜向加筋水泥土地下连续墙的嵌固段, 根据各节点的位移连续性条件及静力平衡条件, 由式(13) (14)可得排桩或斜向加筋水泥土地下连续墙和地基相互作用的整体刚度方程为:

$$\{P\} = [A] \{w\} \quad (15)$$

式中: $[A]$ 为排桩或斜向加筋水泥土地下连续墙的嵌固段和地基相互作用的整体刚度矩阵; $\{P\}$ 为嵌固段的节点力列阵; $\{w\}$ 为嵌固段的节点位移列阵。

4) 人字形支护结构整体刚度方程

利用坑底以上与坑底以下的排桩和斜向加筋水泥土地下连续墙连接节点、排桩桩顶和斜向加筋水泥土地下连续墙墙顶连接节点的位移连续性条件及静力平衡条件, 由式(13) (15)可得排桩与斜向加筋水泥土地下连续墙组成的人字形支护结构整体刚度方程为:

$$\{F\} = [K] \{\delta\} \quad (16)$$

式中: $\{K\}$ 为人字形支护结构整体刚度矩阵。由式(16)可看出, 如果已知人字形支护结构的节点力, 就可求出相应的节点位移。

问题的边界条件为:

$$\left. \begin{array}{l} \text{桩底为铰支时: } M_n = 0, w_n = 0 \\ \text{桩底为固支时: } w_n = 0, \varphi_n = 0 \\ \text{墙底为铰支时: } M_n = 0, u_n = w_n = 0 \\ \text{墙底为固支时: } u_n = w_n = 0, \varphi_n = 0 \end{array} \right\} \quad (17)$$

4. 工程算例与验证

4.1. 工程概况

为验证人字形支护结构计算方法的合理性, 以作者所设计的株洲市未来国际中心基坑工程为算例。本工程场地较为平整, 根据现场场地周边道路路面标高, 基坑开挖深度约 7.5~8.0 m 不等。本次基坑支护总长度约 400 m。该工程地下室边线距用地红线 4.5~5.0 m。现以开挖深度 8.0 m 的人字形支护结构支护段为例进行计算分析。根据场地岩土工程勘察报告揭露, 组成基坑侧壁岩土主要为: ① 4.8 m 厚素填土;

② 3.2 m 厚软塑粉质黏土；③ 7.5 m 厚碎石土；④ 4.7 强风化泥质粉砂岩；⑤ 中风化泥质粉砂岩，未揭穿。相关岩土参数如表 1 所示。

Table 1. Physical parameters of soil
表 1. 土的物理参数

土层编号	土层名称	重度(KN/m ³)	内摩擦角(°)	黏聚力(kPa)
①	素填土	18.0	10.0	10.0
②	粉质黏土	19.0	10.0	10.0
③	碎石土	21.0	35	10.0
④	强风化泥岩	23.2	40 (综合内摩擦角)	
⑤	中风化泥岩	24.3	48 (综合内摩擦角)	

4.2. 支护结构设计计算

根据本工程场地周边情况及地质条件，不宜采用双排桩或桩锚劫掠。经专家论证，最终决定采用止水与支护合为一体的人字形支护结构，采用高压旋喷桩形成与地面成 50°角，内插型钢的水泥土墙。结构形式如图 4 所示。前排直径为 1.0 m，间距 2.0 m。水泥土墙厚 1.0 m，排桩及水泥土墙在坑底以下的嵌固深度均为 8.0 m。排桩桩顶冠梁截面尺寸为 1100 × 800 mm。在水泥土墙的型钢顶端焊接若干根钢筋锚入桩顶。所有构件混凝土强度等级均为 C30。

实际计算中，桩底边界条件视为铰支。水泥土墙与排桩的连接视为铰接。排桩及水泥土墙在坑底以下的嵌固段按弹性地基梁计算，将嵌固段分成 16 段，每段长 0.5 m。坑底以上受荷段采用刚架单元，单元长 0.5 m。计算简图如图 4 所示。地基系数按《建筑基坑支护技术规程》(JGJ120-2012)中的公式计算：

$$m = \frac{0.2\varphi^2 - \varphi + c}{v_b} \quad (18)$$

式中： c, φ 分别为土的黏聚力(kPa)和土的内摩擦角(°)； v_b 支护结构在坑底处的水平位移(mm)，可取 $v_b = 10$ mm。地基水平向基床系数 $K = mz$ 。图 4、图 5 分别为人字形支护结构中的排桩及水泥土墙横截面上弯矩及法向位移计算结果。

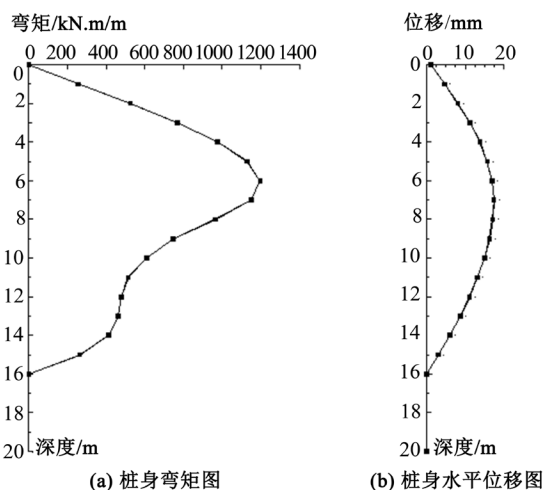


Figure 4. Calculation results of row piles of herringbone supporting structure
图 4. 人字形支护结构排桩计算结果

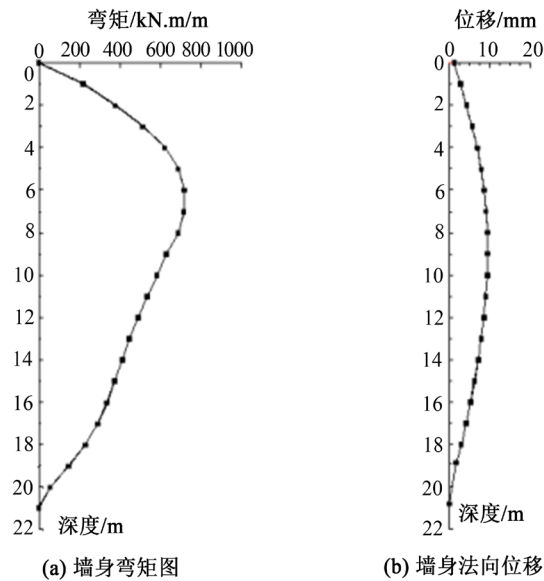


Figure 5. Calculation results of cement-soil of herringbone supporting structure
图 5. 人字形支护结构水泥土墙计算结果

4.3. 工程实测结果分析

根据基坑变形监测结果,选取支护段中部排桩桩顶监测点为代表进行对比分析。基坑一次开挖到坑底 15 天后,排桩桩顶位移仅 2.3 mm,且桩顶水平位移基本趋于稳定,理论值与实测值相差 2.5%。结果表明:实测值与理论值很接近,这说明本文提出的人字形支护结构有限元分析模型及计算方法是合理的,这对人字形支护结构设计有指导意义。同时,工程应用情况表明:人字形支护结构具有抗变形能力强,特别适用于狭窄、富水复杂场地深基坑支护。

5. 结论

本文基于 Winkler 地基梁基本思想,考虑斜向加筋水泥土墙的摩擦效应,建立了考虑桩土效应的人字形支护结构平面杆系有限元模型,构建了人字形支护结构工作性状分析的整体刚度矩阵,并应用于工程实际,取得了良好的经济及社会效益。工程应用及理论计算结果表明,计算位移与监测位移具有较好的一致性,计算内力有较好的规律性和可比性,为人字形支护结构设计计算提供了可参考的理论依据。

基金项目

国家自然科学基金资助项目(NO: 51978260)。

参考文献

- [1] 何颐华,杨斌,金宝森,等. 双排护坡桩试验与计算的研究[J]. 建筑结构学报, 1996, 17(2): 58-66.
- [2] 戴智敏,阳凯凯. 深基坑双排桩支护结构体系受力分析与计算[J]. 信阳师范学院学报, 2002(3): 348-351.
- [3] 郑刚,李欣,刘畅. 考虑桩土相互作用的双排桩分析[J]. 建筑结构学报, 2004, 25(1): 99-106.
- [4] 应宏伟,初振环. 带撑双排桩支护结构性状分析[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(S1): 1450-1454.
- [5] 平扬,白世伟,曹俊坚. 深基坑双排桩空间协同计算理论及位移反分析[J]. 土木工程学报, 2001, 2(34): 79-84.
- [6] 吴才德,龚迪快,王洁栋. 门架加锚杆复合结构在超大基坑中的应用[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(12): 1781-1785.
- [7] 吴刚,白冰,聂庆科. 深基坑双排桩支护结构设计计算方法研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(10): 2753-2758.

- [8] 刘泉声, 付建军. 考虑桩土效应的双排桩模型及参数研究岩土力学, 2011, 32(2): 481-486.
- [9] 刘钊. 双排支护结构分析及试验研究[J]. 岩土工程学报, 1992, 14(5): 76-80.
- [10] 龚晓南. 土工计算机分析[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000: 137.