

成层地基中考虑桩桩相互作用的 双排桩受力变形分析

张玲[†], 欧强, 朱幸仁

(湖南大学 岩土工程研究所, 湖南 长沙 410082)

摘要:基于成层地基中的双排桩支护结构的受力变形特点,将前、后排桩视为竖直插入成层地基中的弹性地基梁,以不同刚度的水平弹簧模拟前、后排桩与其间成层地基土体的相互作用.以各个土层接触面为水平分界面,将前、后排桩支护结构分为若干单元段,以朗肯土压力理论计算作用于后排桩的主动土压力,以弹性抗力法计算作用于前排桩基坑底面以下的土体抗力,且考虑地基反力系数沿深度的线性变化.基于 Euler-Bernoulli 双层地基梁理论,考虑桩桩及桩土相互作用得到成层地基中双排桩支护结构的挠曲微分方程,并采用幂级数法求解,然后根据界面处内力与位移的连续条件及桩顶、桩底的边界条件,得到任一深度桩身的水平位移、转角、剪力与弯矩计算式.最后通过一工程实例分析,将本文方法计算结果与实例结果进行对比分析,验证了本文方法的正确性.

关键词:成层地基;双排桩;桩桩相互作用;幂级数解

中图分类号:TU 443

文献标志码:A

Analysis on Forced Deformation of Double Row Piles Considering Pile-pile Interaction in Layered Foundation

ZHANG Ling[†], OU Qiang, ZHU Xingren

(Institute of Geotechnical Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract:Based on the force and deformation characteristics of the double-row pile retaining structure in the layered foundation, the front and rear row piles were regarded as elastic foundation beams inserted vertically into the layered foundation, and the interaction between the front and rear row piles and the layered soil is simulated by a series of horizontal springs with different stiffnesses. Taking the contact surface of each soil layer as the interface, the front and rear row pile support structures are divided into several parts. The active earth pressure acting on the rear row piles is calculated by Rankine earth pressure theory, and the passive earth pressure below the bottom surface of pit foundation of the front row pile is calculated by elastic resistance method, taking into account the linear variation of resistance coefficient of foundation along the depth. Based on the theory of Euler-Bernoulli double-layer foundation beam, the pile-pile and pile-soil interaction are considered to obtain the differential equations and the power series solutions of double-row pile support structure in the layered foundation. Then, according to the continuous condi-

* 收稿日期:2019-11-20

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51678231, 52078205), National Natural Science Foundation of China(51678231, 52078205); 湖南省自然科学基金资助项目(2020JJ3013), Natural Science Foundation of Hunan Province(2020JJ3013)

作者简介:张玲(1982—), 女, 浙江临海人, 湖南大学副教授, 博士

[†] 通讯联系人, E-mail: zhanglh@163.com

tions of internal force and displacement and the boundary conditions of pile top and bottom, the horizontal displacement, rotation, shear force and the bending moment of any depth of pile can be obtained. Finally, through one engineering example, the calculation results of this method are compared with the reported results, which verifies the feasibility of the proposed method.

Key words: layered foundation; double-row pile; pile-pile interaction; power series solution

近十多年来,由前排桩、后排桩和连系梁(板)组成的双排桩支护结构,因其具有较大的侧向刚度,可有效限制支护结构变形且不需设置内支撑,相较于拉锚结构又无需太多场地,而在基坑支护工程中得到广泛应用^[1-8]。但双排桩支护结构受力变形机理及设计计算非常复杂,为此国内外不少学者对此展开了深入研究。余志成等^[9]首先在深基坑挡土护坡桩中采用双排桩支护形式,并通过模型试验验证了双排桩的整体刚度大和水平位移小的特点。OU 等^[10]进行了基坑开挖的数值模拟分析,研究了基坑开挖过程对双排桩支护结构的作用效应。何颐华等^[11]基于土拱理论提出一种双排桩支护结构的土体积比例系数法,认为前、后排桩所受侧向土压力是按前、后排桩之间滑动土体占土体总量的比例关系确定的。刘钊^[12]提出了桩土相互作用的 3 种情况,分为基坑底面以上部分桩后土、桩间土以及基坑底面以下的土。黄强^[12]基于朗肯土压力理论,首次提出刚塑性分析法,通过独立的刚塑性体分析桩间土体,并提出了空间效应系数。曹净等^[13]通过引入等效桁架模型,将前、后排桩桩间土等效为平面桁架结构,进而提出一种基坑双排桩支护结构的改进计算模型。张玲等^[14]考虑桩桩相互作用对双排桩进行了受力变形分析。彭文祥等^[8]、张虎元等^[15]、郑轩等^[16]对双排桩结构最佳排距和破坏形式进行了模型试验研究。

以上研究大都是基于均质地基中的双排桩支护结构进行分析,但实际的土层大多是成层的,因此有必要对成层地基中的双排桩支护结构开展研究。高阳等^[17]采用有限差分数值方法,考虑了桩土相互作用对双排桩进行了三维动态分析。顾问天等^[18]基于比例系数法和排桩反力弹簧原理提出了反力弹簧法,不同土层选用不同刚度的弹簧进行模拟,可准确描述土的变形情况和土体分层情况。杨德建等^[19]和尹建峰等^[20]得到了相似的规律。上述研究^[18-20]表明,考虑地基土的成层性对描述双排桩支护结构的受力

和变形更加符合实际情况,但忽略了桩-桩相互作用。实际工程中,当后排桩桩后作用水平推力时,后排桩向坑内发生挠曲变形并挤压桩间土体;受挤压的桩间土体传递水平荷载,又对前排桩产生水平推力作用,使其也向坑内发生挠曲变形,进而挤压前排桩桩前土体。但通常桩间土具有一定程度水平向的压缩变形,前、后排桩挠曲变形不一致。蔡袁强等^[21]指出双排桩间距过小时,支护结构特性与悬臂式单排桩性能相似。当排距过大时,其特性与拉锚桩相似;当排距等于 4 倍桩径时,支护结构才能发挥最大的性能。郑刚等^[22]提出了一种考虑部分桩土相互作用的平面杆系有限元双排桩分析模型,将双排桩之间土视为薄压缩层,并以水平向弹簧模拟。因此对成层地基中的双排桩支护结构进行分析研究时,应充分考虑桩桩以及桩土的相互作用。

鉴于此,本文在郑刚等人^[22]研究的基础上,基于 Euler-Bernoulli 双层梁理论,充分考虑桩桩相互作用、桩土相互作用、地基土成层性以及地基反力系数的线性变化等因素的影响,对双排支护桩的受力变形进行分析,以为双排桩支护结构的设计计算提供参考。

1 计算模型的建立

1.1 双排桩计算模型

根据文献[22]的平面杆系有限元模型,建立如图 1 所示计算模型。图中前、后排桩等长,桩身总长度为 L ,排距为 D ,基坑开挖深度为 h ,以基坑开挖面为界,开挖面以上 n_1 层土,开挖面以下 n_2 层,以土层分界面对桩身进行分段,共分为 N 段, $N = n_1 + n_2$ 。每层土中的桩段均有一个独立的“ $y-z$ ”坐标系与其对应。参考文献[22],将成层地基中的前、后排桩与桩间土的相互作用以不同刚度的水平弹簧模拟。为便于计算,作如下假定:

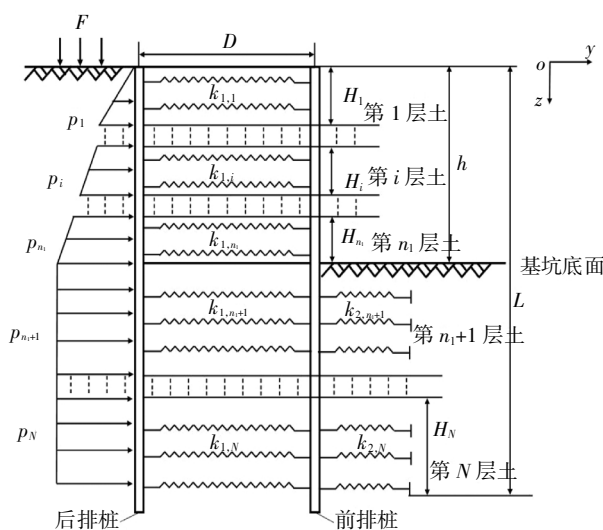


图1 成层地基中双排桩支护结构计算模型

Fig.1 Calculation model of double-row pile in layered foundation

1) 前、后排桩均视为竖向放置的 Euler-Bernoulli 梁;

2) 连系梁视为刚性体,即忽略其轴向的压缩或拉伸变形;

3) 连系梁与前、后排桩顶的连接为刚性连接.

1.2 受力分析

1.2.1 后排桩桩后土压力的计算

后排桩桩后土压力按朗肯主动土压力计算^[23],且开挖面以下土压力视为矩形分布,如图1所示.

$$p_i = \left[\left(F + \sum_{n=1}^{i-1} \gamma_n H_n + \gamma_i z_i \right) k_{ai} - 2c_i \sqrt{k_{ai}} \right] b. \quad (1)$$

式中: p_i 为第*i*层土作用在后排桩上的主动土压力强度,kPa; F 为地面超载,kN; γ_i 为第*i*层土的天然重度,kN/m³; H_n 为第*n*层土的厚度,m; z_i 为第*i*层土的厚度,m; c_i 为第*i*层土的黏聚力,kPa; b 为桩间距,m; k_{ai} 为第*i*层土的朗肯主动土压力系数, $1 \leq i \leq N$.

1.2.2 桩间土作用力的计算

前、后排桩在水平推力作用下发生挠曲变形,结合双排桩支护结构计算模型(图1),桩间土相互作用力可表示为式(2).

$$q_{1,i} = k_{1,i} b_0 (y_{1i} - y_{2i}). \quad (2)$$

式中: $q_{1,i}$ 为基坑第*i*层土的桩土相互作用力,kN; b_0 为桩的计算宽度,m,按表1选取^[24]; y_{1i} 为后排桩第*i*段桩身的挠曲变形,mm; y_{2i} 为前排桩第*i*段桩身的挠曲变形,mm; $k_{1,i}$ 为第*i*层土的地基反力系数,当桩长大于桩排距的4倍(即相当于大于桩间土厚度5

倍)时,通常可将其理解为薄压缩层,因此可通过式(3)计算 $k_{1,i}$ 值^[22].

$$k_{1,i} = \frac{E_{si}}{D}. \quad (3)$$

式中: E_{si} 为水平方向桩间土的压缩模量平均值,其值按工程地质手册确定.

当桩长小于桩排距的4倍,且桩身入土深度范围内存在多层土时,考虑地基反力系数 $k_{1,i}$ 随深度呈线性变化,每层土的 $k_{1,i}$ 可按式(4)计算.

$$k_{1,i} = k_i^0 + m_i z_i. \quad (4)$$

式中: k_i^0 为第*i*层土顶面的地基反力系数,kPa; m_i 为第*i*层土的地基系数比例系数; z_i 为第*i*层土的计算高度,m.

表1 桩的计算宽度

Tab.1 Calculation width of pile

桩径(或桩宽)/m	矩形桩	圆形桩
$b \leq 1$	$b_0 = 1.5b + 0.5$	$b_0 = 0.9(1.5b + 0.5)$
$b > 1$	$b_0 = b + 1$	$b_0 = 0.9(b + 1)$

1.2.3 前排桩桩前土抗力的计算

前排桩桩前基坑底面以下土体抗力为:

$$q_{2,i} = k_{2,i} b_0 y_{2i}. \quad (5)$$

式中: $q_{2,i}$ 为前排桩土体抗力,kN; $k_{2,i}$ 为第*i*层土的地基反力系数,当 $1 \leq i \leq n_1$ 时,前排桩桩前为基坑开挖区,无地基反力作用,即:

$$k_{2,i} = 0, 1 \leq i \leq n_1. \quad (6)$$

当 $n_1 + 1 \leq i \leq N$ 时,考虑地基反力系数 $k_{2,i}$ 随深度的线性变化,

$$k_{2,i} = k_i^0 + m_i z_i, n_1 + 1 \leq i \leq N. \quad (7)$$

2 基本方程的建立与求解

2.1 基本方程的建立

根据上文对前、后排桩受力特点的分析,分别建立双排桩各微段的挠曲变形微分方程.

后排桩, $0 < i < N$:

$$EI \frac{d^4 y_{1i}}{dz_i^4} + k_{1,i} b_0 (y_{1i} - y_{2i}) = p_i. \quad (8)$$

前排桩, $0 < i < N$:

$$EI \frac{d^4 y_{2i}}{dz_i^4} + k_{2,i} b_0 y_{2i} = k_{1,i} b_0 (y_{1i} - y_{2i}). \quad (9)$$

式中: EI 为桩身抗弯刚度.

2.2 基本方程的求解

将式(8)改写为:

$$y_{2i} = \frac{EI}{b_0 k_{1,i}} \frac{d^4 y_{1i}}{dz_i^4} + y_{1i} - \frac{p_i}{k_{1,i} b_0}. \quad (10)$$

将式(10)求 4 次导数,并结合式(9)可得:

当 $0 < i < n_1$ 时,

$$\frac{d^8 y_{1i}}{dz_i^8} + \frac{2b_0 k_{1,i}}{EI} \frac{d^4 y_{1i}}{dz_i^4} = \frac{b_0 k_{1,i}}{(EI)^2} p_i. \quad (11)$$

当 $n_1 + 1 < i < N$ 时,

$$\frac{d^8 y_{1i}}{dz_i^8} + \frac{b_0(2k_{1,i} + k_{2,i})}{EI} \frac{d^4 y_{1i}}{dz_i^4} + \frac{b_0^2 k_{1,i} k_{2,i}}{(EI)^2} y_{1i} = \frac{b_0(k_{1,i} + k_{2,i})}{(EI)^2} p_i. \quad (12)$$

式(11)(12)为 8 阶非齐次非线性常微分方程,可采用幂级数进行求解,设

$$y_i = a_0 + a_1 z + a_2 z^2 + \cdots + a_n z^n + \cdots = \sum_{n=0}^{\infty} a_n z^n. \quad (13)$$

式中: y_i 为第 i 段桩身侧向位移, mm; a_n 为待定系数,其中 $n = 0, 1, 2, \cdots$

对式(13)分别求 4 次导数和 8 次导数,再代入式(11),比较系数可得:

$$\begin{aligned} a_8 &= 0; \\ a_9 &= \frac{(Fk_{ai} - 2c_i \sqrt{k_{ai}})bb_0 - 2b_0 \times 4 \times 3 \times 2 \times 1 \times a_4}{9 \times 8 \times 7 \times 6 \times 5 \times 4 \times 3 \times 2 \times 1 \times EI}; \\ a_{10} &= \frac{-k_{ai}bb_0 + 2b_0 \times 5 \times 4 \times 3 \times 2 \times a_5}{10 \times 9 \times 8 \times 7 \times 6 \times 5 \times 4 \times 3 \times 2 \times EI}; \\ a_n &= \frac{-(n-5)(n-6)(n-7)(n-8)a_{n-5}}{n(n-1)(n-2) \cdots (n-7)}, n \geq 11. \end{aligned} \quad (14)$$

令

$$y(z) = \sum_{j=0}^7 a_j x_j. \quad (15)$$

其中:

$$\begin{aligned} x_j &= \sum_{n=0}^{\infty} c_{j,n} z^n. \\ c_{j,8} &= 0; \\ c_{j,9} &= \frac{(Fk_{ai} - 2c_i \sqrt{k_{ai}})bb_0 - 2b_0 \times 4 \times 3 \times 2 \times 1 \times c_{j,4}}{9 \times 8 \times 7 \times 6 \times 5 \times 4 \times 3 \times 2 \times EI}; \\ c_{j,10} &= \frac{-k_{ai}bb_0 + 2b_0 \times 5 \times 4 \times 3 \times 2 \times c_{j,5}}{10 \times 9 \times 8 \times 7 \times 6 \times 5 \times 4 \times 3 \times 2 \times EI}; \\ c_{j,n} &= \frac{-(n-5)(n-6)(n-7)(n-8)c_{j,n-5}}{n(n-1)(n-2) \cdots (n-7)}, n \geq 11. \end{aligned} \quad (16)$$

$$c_{i,j} = \begin{cases} 1, i=j, i,j=0,1,2,3,4,5,6,7; \\ 0, i \neq j, i,j=0,1,2,3,4,5,6,7. \end{cases}$$

第 i 层土里的桩段转角 θ_i 、弯矩 M_i 和剪力 Q_i 可分别表示为:

$$\begin{cases} \theta_i = \frac{dy_i}{dz_i}, \\ M_i = EI \frac{d^2 y_i}{dz_i^2}, \\ Q_i = EI \frac{d^3 y_i}{dz_i^3}. \end{cases} \quad (17)$$

将式(15)代入式(17)可得,

$$\begin{cases} \theta_i = \sum_{i=0}^7 a_i x'_i, \\ M_i = EI \sum_{i=0}^7 a_i x''_i, \\ Q_i = EI \sum_{i=0}^7 a_i x'''_i. \end{cases} \quad (18)$$

联立式(15)、(18),可得:

$$\begin{bmatrix} y_{li} \\ \theta_{li} \\ M_{li} \\ Q_{li} \\ y_{2i} \\ \theta_{2i} \\ M_{2i} \\ Q_{2i} \end{bmatrix} = \mathbf{TT}_i \begin{bmatrix} y_{li,0} \\ \theta_{li,0} \\ M_{li,0} \\ Q_{li,0} \\ y_{2i,0} \\ \theta_{2i,0} \\ M_{2i,0} \\ Q_{2i,0} \end{bmatrix}. \quad (19)$$

式中: $y_{i,0}, \theta_{i,0}, M_{i,0}, Q_{i,0}$ 分别为第 i 桩段顶端, 即 $z_i = 0$ 处的侧向位移、转角、弯矩和剪力; $\mathbf{TT}_i$ 为第 i 桩段的内力位移传递矩阵, 可表示为式(20).

$$\mathbf{TT}_i = \mathbf{T}_i (\mathbf{T}_i|_{z_i=0})^{-1}. \quad (20)$$

式中:

$$\mathbf{T}_i = \begin{bmatrix} y_{li,0} & y_{li,1} & y_{li,2} & y_{li,3} & y_{li,4} & y_{li,5} & y_{li,6} & y_{li,7} \\ y_{2i,0} & y_{2i,1} & y_{2i,2} & y_{2i,3} & y_{2i,4} & y_{2i,5} & y_{2i,6} & y_{2i,7} \\ Ey_{li,0} & Ey_{li,1} & Ey_{li,2} & Ey_{li,3} & Ey_{li,4} & Ey_{li,5} & Ey_{li,6} & Ey_{li,7} \\ Ey_{2i,0} & Ey_{2i,1} & Ey_{2i,2} & Ey_{2i,3} & Ey_{2i,4} & Ey_{2i,5} & Ey_{2i,6} & Ey_{2i,7} \\ y_{2i,0} & y_{2i,1} & y_{2i,2} & y_{2i,3} & y_{2i,4} & y_{2i,5} & y_{2i,6} & y_{2i,7} \\ y_{2i,0} & y_{2i,1} & y_{2i,2} & y_{2i,3} & y_{2i,4} & y_{2i,5} & y_{2i,6} & y_{2i,7} \\ Ey_{2i,0} & Ey_{2i,1} & Ey_{2i,2} & Ey_{2i,3} & Ey_{2i,4} & Ey_{2i,5} & Ey_{2i,6} & EI y_{2i,7} \end{bmatrix}$$

根据第 i 桩段与第 $i-1$ 桩段在土层分界面处的位移与内力的连续性条件, 可得:

$$\begin{bmatrix} y_{1i,0} \\ \theta_{1i,0} \\ M_{1i,0} \\ Q_{1i,0} \\ y_{2i,0} \\ \theta_{2i,0} \\ M_{2i,0} \\ Q_{2i,0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{1(i-1),1(i-1)} \\ \theta_{1(i-1),1(i-1)} \\ M_{1(i-1),1(i-1)} \\ Q_{1(i-1),1(i-1)} \\ y_{2(i-1),1(i-1)} \\ \theta_{2(i-1),1(i-1)} \\ M_{2(i-1),1(i-1)} \\ Q_{2(i-1),1(i-1)} \end{bmatrix}. \quad (21)$$

式中: $y_{1(i-1),1(i-1)}$, $\theta_{1(i-1),1(i-1)}$, $M_{1(i-1),1(i-1)}$, $Q_{1(i-1),1(i-1)}$, $y_{2(i-1),1(i-1)}$, $\theta_{2(i-1),1(i-1)}$, $M_{2(i-1),1(i-1)}$, $Q_{2(i-1),1(i-1)}$ 分别为两个桩的 $i-1$ 桩段的底端位移、转角、弯矩和剪力。

根据传递矩阵法,结合式(19)(21),将第 i 段到第 1 段的内力位移连乘,即可获得 i 段与第 1 段的内力和位移的关系。

同理将式(13)求 4 次和 8 次导数并结合式(12)可得开挖面以下后排桩桩身挠曲变形方程的系数。后续计算同前一致,最后再结合桩顶和桩底的边界条件即可求解前、后排桩的桩身位移、转角、弯矩与剪力。对于桩底的约束条件可考虑以下几种情况:

- 1) 桩底受铰接约束作用,即弯矩和位移为 0;
- 2) 桩底只受竖向约束作用,即弯矩和剪力为 0;
- 3) 桩底为自由端,即弯矩和剪力为 0。

3 算例验证

采用本文方法对文献[22]的双排桩支护结构进行分析。工程情况简介如下:某酒店工程基坑地面以上 17 层(局部 19 层),地下 1 层。基坑开挖深度为 6 m,地下水位于 1 m 左右,工程地质状况见表 2。基坑支护结构采用双排钻孔灌注桩排列成梅花形状,桩顶设置冠梁,桩顶位于自然地面下 2 m。基坑围护结构主要设计参数是:双排桩,桩径 600 mm,桩长 16.8 m,排间距 2.5 m,桩间距 1.5 m, m 值根据天津软土经验值取 1 500 kN/m³,其他工程资料详见文献[22]。

根据实际情况确定边界条件:前、后排桩桩底位移、弯矩为 0;前、后排桩桩顶位移相等,前排桩桩顶转角为 0。文献[22]考虑基坑开挖面以上后排桩土压力呈三角形分布,基坑开挖面以下为矩形分布,并且考虑桩间土与前、后排桩的相互作用进行了理论计算分析。将本文方法计算结果与文献[22]结果进行比较,比较结果如图 2 和图 3 所示。

表 2 各土层物理力学参数指标

Tab.2 Physical and mechanical parameters of each soil layer

土层名称	层厚/m	埋深/m	重度/(kN·m ⁻³)	c /kPa	φ /($^{\circ}$)
素填土	1.2	1.2			
黏土 1	1.6	2.8	19.0	21	8.5
淤泥质黏土	10.2	13.0	17.8	17	10
黏土 2	4.0	17.0	18.2	22	10
粉土	1.5	18.5	20.1	15	25

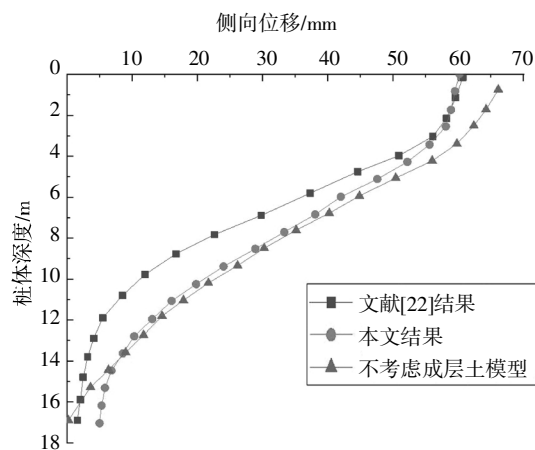


图 2 前排桩侧向位移图

Fig.2 Lateral displacement diagram of the front row piles

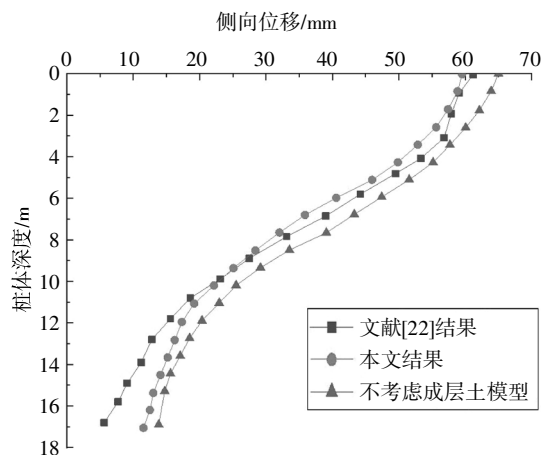


图 3 后排桩侧向位移图

Fig.3 Lateral displacement diagram of the rear row piles

由前、后排桩的侧向位移对比分析得知:本文前排桩的变形趋势与文献[22]结果基本一致,前排桩桩身侧移在桩身下半部分有一定增大的趋势,这主要是本文使用一系列非线性弹簧更加合理地考虑了桩土相互作用。后排桩的侧向位移在开挖面以上和文献[22]吻合较好,在开挖面以下有一定的差异,可能

是由于本文假设后排桩基坑底面以下的主动土压力随土层线性变化,而文献[22]则假设基坑底面以下的土压力为矩形分布,在深度较大时,本文计算的土压力较文献[22]偏大,从而导致作用在双排桩上的横向荷载偏大,因此在后排桩的底部侧移较文献 [22]偏大. 本文土压力的分布假设更加符合建筑基坑支护技术规程^[23]的要求. 从整个双排桩支护结构来看,前、后排桩的侧向位移与文献[22]的变化趋势基本一致,验证了本文方法的合理性.

此外,由图 2、图 3 亦可见,若不考虑土的成层性,前排桩在桩顶部分侧向位移会偏大,在桩底会偏小. 这是由于不考虑土的成层性,利用加权平均计算一个假想的单一土层的参数,在桩顶部分会过高估计桩土相互作用,使得桩顶部分侧向位移偏大,反之在桩底部分则会低估桩土相互作用使得桩底位移偏小. 后排桩的侧向位移在不考虑土层成层性的情况下,侧向位移趋势与本文结果基本一致,但是在数值上较考虑土的成层性增大了 10%~20%. 由此可见:地基土的成层性对双排桩支护结构的受力变形有较大影响,在相关设计计算时需考虑地基土的成层性.

4 结 论

本文基于 Euler-Bernoulli 双层地基梁理论,对成层地基中的双排桩支护结构的受力变形进行了分析. 本文方法具有如下优点:

1)可考虑地基土的成层性、桩土相互作用、前排桩的设置对后排桩受力变形的影响以及地基反力系数随土层的变化.

2)将前、后排桩分别视为竖向放置的弹性结构,将桩身穿过的地基土理想为水平向的弹性均质体,以不同刚度的水平弹簧模拟前、后排桩与其间成层地基土体的相互作用,借此来完成前、后排桩的相互作用力的传递和变形协调.

3)获得了前、后排桩支护结构各微段的位移与内力的幂级数解答.

采用本文方法对某工程实例进行分析,并与实测值进行对比表明,本文方法计算结果在一定程度上能够反映双排桩支护结构的侧向位移趋势,并且较不考虑土的成层性更接近于实测值,说明本文的计算方法具有一定的可行性. 但是对于复杂的地下

结构,土与结构共同作用以及土体的非线性行为等都对支护结构的变形有着很大的影响,双排支护结构桩桩、桩土相互作用过程极为复杂,因此相关研究工作仍有待进一步深入.

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):56—58.
HE Y H, YANG B, JIN B S, *et al.* Study on experiment and calculation of double-row slope protection piles [J]. Journal of Building Structures, 1996, 17(2):56—58. (In Chinese)
- [2] 黄强. 深基坑支护工程设计技术[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1995:147—158.
HUANG Q. Design techniques for deep foundation pit support engineering [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1995: 147—158. (In Chinese)
- [3] 王湛,刘冰花. 双排桩计算方法探讨[J]. 东北地震研究,2001,17(2):64—68.
WANG Z, LIU B H. Discussion on the calculation method of double-row piles [J]. Northeastern Seismological Research, 2001, 17(2):64—68. (In Chinese)
- [4] DON F, JENNY W, SUSAN E, *et al.* Foundations and earth retaining structures [M]. New York: John Wiley & Sons, 2008:274—297.
- [5] STEWART D P, JEWELL R J, RANDOLPH M F. Design of piled bridge abutments on soft clay for loading from lateral soil movements [J]. Geotechnique, 1994, 46(2):277—296.
- [6] 杨光华,黄忠铭,姜燕,等. 深基坑支护双排桩计算模型的改进[J]. 岩土力学,2016,37(S2):1—15.
YANG G H, HUANG Z M, JIANG Y, *et al.* Improved calculation model for double-row piles supporting deep foundation pits [J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(S2):1—15. (In Chinese)
- [7] 钱国伟. 深基坑双排桩支护桩间土计算模型及受力机理研究[D]. 昆明:昆明理工大学建筑工程学院,2017:29—79.
QIAN G W. Soil calculation model and mechanism of double-row piles in deep foundation pit [D]. Kunming: Faculty of Civil Engineering and Mechanics, Kunming University of Science and Technology, 2017:29—79. (In Chinese)
- [8] 彭文祥,刘彬. 深基坑双排桩支护排距室内模型试验研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2018,45(1):121—127.
PENG W X, LIU B. Indoor model test study on row spacing of double-row piles supporting deep excavation pit [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2018, 45(1):121—127. (In Chinese)
- [9] 余志成,施文华. 深基坑护坡桩技术的几项新发展[J]. 建筑技术,1994,21(5):272—279.
YU Z C, SHI W H. Several new developments of deep foundation pit

- protection pile technology [J]. Building Technology, 1994, 21(5): 272—279. (In Chinese)
- [10] OU C Y, CHIOU D C, WU Z S. Three dimensional finite element analysis of deep excavations [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1996, 122(5): 337—345.
- [11] 刘钊. 双排支护桩结构的分析及试验研究 [J]. 岩土工程学报, 1992, 14(5): 76—80.
- LIU Z. Analysis and experiment study of the double row support pile structure [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1992, 14(5): 76—80. (In Chinese)
- [12] 黄强. 护坡桩空间受力简化计算方法 [J]. 建筑技术, 1989, 16(6): 43—45.
- HUANG Q. Simplified method for calculating spatial force of slope protection pile [J]. Building Technology, 1989, 16(6): 43—45. (In Chinese)
- [13] 曹净, 钱国伟, 杨泽帅, 等. 基于等效桁架模型的基坑双排桩结构计算模型研究 [J]. 防灾减灾工程学报, 2018, 38(6): 943—949.
- CAO J, QIAN G W, YANG Z S, *et al.* Study on calculation model of double-row piles retaining wall based on equivalent truss model [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2018, 38(6): 943—949. (In Chinese)
- [14] 张玲, 朱幸仁, 欧强. 考虑桩桩相互作用的双排支护桩受力变形分析[J]. 水文地质工程地质, 2019, 46(5): 72—80.
- ZHANG L, ZHU X R, OU Q. Analysis of forced deformation of double row support piles considering pile interaction [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2019, 46(5): 72—80. (In Chinese)
- [15] 张虎元, 李秀祥. 黄土基坑双排桩支护结构的有限元分析[J]. 地下空间与工程学报, 2016, 12(4): 1102—1109.
- ZHANG H Y, LI X X. The finite element analysis on the retaining structure for loess foundation pit with double-row piles [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2016, 12(4): 1102—1109. (In Chinese)
- [16] 郑轩, 朱文秀, 周一君. 双排桩支护结构变形规律模型试验研究 [J]. 建筑结构, 2018, 48(S1): 763—767.
- ZHENG X, ZHU W X, ZHOU Y J. Model tests study on deformation mechanism of double-row-piles wall [J]. Building Structure, 2018, 48(S1): 763—767. (In Chinese)
- [17] 高阳, 孙浩凯, 刘日成. 基坑的双排桩支护设计及变形规律[J]. 山东大学学报(工学版), 2019, 49(3): 86—94.
- GAO Y, SUN H K, LIU R C. Slope deformation and parameters sensitivity in the design of double-row supporting piles [J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2019, 49(3): 86—94. (In Chinese)
- [18] 顾问天, 赵有明, 刘国楠. 反力弹簧法解双排桩结构内力[J]. 中国铁道科学, 2007, 28(6): 12—18.
- GU W T, ZHAO Y M, LIU G N. Internal force analysis of double-row piles using concentrated spring method [J]. China Railway Science, 2007, 28(6): 12—18. (In Chinese)
- [19] 杨德健, 王铁成, 尹建峰. 双排桩支护结构受力变形及影响因素分析[J]. 建筑结构, 2008, 38(4): 50—52.
- YANG D J, WANG T C, YIN J F. Analysis on stressed deformation and affected factors of double-row pile retaining structure [J]. Building Structure, 2008, 38(4): 50—52. (In Chinese)
- [20] 尹建峰, 李卫平, 张宗胜, 等. 双排桩支护结构受力特点与影响因素研究[J]. 天津城市建设学院学报, 2007, 13(2): 100—103.
- YIN J F, LI W P, ZHANG Z S, *et al.* Analysis of stress deformation and influencing factors of double-row piles retaining structure [J]. Journal of Tianjin Institute of Urban Construction, 2007, 13(2): 100—103. (In Chinese)
- [21] 蔡袁强, 赵永倩, 吴世明, 等. 软土地基深基坑中双排桩式围护结构有限元分析[J]. 浙江大学学报(自然科学版), 1997, 31(4): 442—448.
- CAI Y Q, ZHAO Y Q, WU S M, *et al.* FEM analysis of the deep pit excavation with retaining structure of the double piles in soft clay [J]. Journal of Zhejiang University (Natural Science), 1997, 31(4): 442—448. (In Chinese)
- [22] 郑刚, 李欣, 刘畅, 等. 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.
- ZHENG G, LI X, LIU C, *et al.* Analysis of double-row pile considering pile-soil interaction [J]. Journal of Building Structures, 2004, 25(1): 99—106. (In Chinese)
- [23] 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.
- JGJ120—2012 Technical specification for foundation pit support [S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2012. (In Chinese)
- [24] 高大钊. 深基坑工程[M]. 北京: 机械工业出版社, 1999: 76.
- GAO D Z. Engineering of deep foundation excavations[M]. Beijing: China Machine Press, 1999: 76. (In Chinese)