

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20200918002

土体侧移作用下桩基侧向土压力的群桩效应*

李琳^{1,2}, 马荣^{1,2}, 李敬梅³, 柳士明^{1,2}, 杨敏⁴

(1. 天津城建大学土木工程学院, 天津 300384; 2. 天津市软土特性与工程环境重点实验室, 天津 300384; 3. 中国铁路设计集团有限公司, 天津 300308; 4. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092)

摘要: 当前工程建设中受土体侧移作用影响的桩基问题越来越突出, 桩侧土压力是桩-土相互作用研究中的重要问题, 并且受群桩效应影响很大, 运用岩土数值计算程序FLAC^{3D}, 针对粘土饱和和不排水情况进行了平面应变数值模拟研究, 土体采用摩尔-库伦理想弹塑性本构关系, 桩基采用线弹性本构关系, 桩-土之间建立接触面。研究结果表明, 桩周粘聚力对桩侧极限土压力有明显影响, 达到桩侧极限土压力所需要的桩土相对位移随 E/C_u 的增大而减小。单排桩时, 随着桩间距增大桩土荷载分担比降低, 桩侧极限土压力值增大, 达到极限土压力时所需要的桩土相对位移增大。双排桩时, 当桩间距大约为 $2D$ 时加筋和遮拦效应影响范围比较小, 然后随桩间距增大加筋和遮拦效应影响范围增大, 而排间距的增大会使遮拦和加筋作用降低, 当排间距大于 $6D$ 后遮拦和加筋效应基本消失, 桩间距和排间距的增大都使达到桩侧极限土压力所需要的桩土相对位移量增大, 并将计算结果与先前学者试验结果进行了对比与分析, 具有较好的一致性并有所发展。

关键词: 土体侧移; 群桩效应; 桩侧极限土压力; 土拱效应; 遮拦效应

中图分类号: TU473.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2022)03-0561-10

The Group Effect on the Lateral Earth Pressure of Piles Subjected to Lateral Soil Movement

LI Lin^{1,2}, MA Rong^{1,2}, LI Jingmei³, LIU Shiming^{1,2}, YANG Min⁴

(1. School of Civil Engineering, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, China; 2. Tianjin Key Laboratory of Soft Soil Characteristics and Engineering Environment, Tianjin 300384, China; 3. China Railway Design Corporation, Tianjin 300383, China; 4. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: At present, the problems of piles subjected to the lateral soil movement become more and more serious in engineering construction. In this aspect, the lateral earth pressure acting on the pile shafts is an important problem for piles-soil interaction studies and is greatly affected by the pile group effect. The plane-strain numerical simulation is carried out for the lateral earth pressure of the passive pile group under undrained conditions in soft clay using the explicit finite difference program FLAC^{3D}. The Mohr-Columb elastic-plastic constitutive model was employed to model the non-linear stress-strain soil behaviour. Piles were assumed to have linear elastic behaviour, and the interface model in-

* 收稿日期:2020-09-18;修回日期:2021-02-22

基金项目:国家自然科学基金项目(41172233)、天津市自然科学基金项目(16JCQNJC07700)、天津市自然科学基金项目(13JCZDJC35500)资助

作者简介:李琳(1971—),男,副教授,硕士,博士。主要从事基础工程和岩土数值模拟方面的教学和研究工作。

E-mail: lilintjuci@126.com

corporated in FLAC^{3D} code was used to simulate the pile-soil contact. The results given by the numerical analysis indicate that the adhesions between the pile and soil had an obvious influence on the lateral limiting soil pressure. The magnitude of relative displacement to mobilize the limiting soil pressure decreased with the E/C_u increasing. With the pile spacing increasing for one row piles, the bearing ratio of piles decreased, and the lateral limiting pressure and the magnitude of relative displacement to reach the lateral limiting pressure all increased. For two row piles, when the pile spacing in a row lied in about $2D$, the shadowing effects and reinforcing effect were obvious. With the pile spacing increasing in a row, the shadowing effects and reinforcing effect became obvious in larger row spacing. With the increase of row spacing, the shadowing effects and reinforcing effects decreased. The shadowing effects and reinforcing effect in the two pile rows disappeared when the rows spacing increased to $6\sim 8D$. In addition, the increase of the pile spacing and row spacing make the magnitude of relative displacement mobilize the limiting earth pressure increase. The results of the numerical investigation were in reasonable agreement with the experiment result and other published solutions and developed here.

Keywords: lateral earth movement; group effect; lateral limiting soil pressure; soil arch effect; shadowing effect

引 言

随着堆载、开挖等工程建设活动的日益增多,由于土体侧移作用而影响到邻近桩基的情况越来越多,这属于“被动桩”的范畴,如抗滑桩、邻近堆载及堤坝的桩基、桥台下桩基、受深基坑开挖影响等的桩基。在土体侧移作用下,桩基会产生附加的弯矩和位移,甚至产生破坏进而引起建筑物的失稳和破坏。土体侧移作用下被动桩基的桩侧极限土压力与桩基最大弯矩等性状有着密切关系,对于解决被动桩与周围土体之间的相互作用具有重要的理论及实际意义。目前被动桩的桩侧极限土压力在设计中一直采用和水平受荷桩相近的数值,一般介于 $9\sim 12C_u$ 。

国内外学者进行了水平受荷桩与土体侧移作用下被动桩的侧向极限土压力研究, M. F. Randolph等^[1], C. M. Martin等^[2]分别运用上下限定理,求得水平受荷桩桩侧极限土压力在桩周粗糙时为 $P_u=11.94C_u$,在桩周光滑时为 $9.14C_u$, J. D. Murff等^[3]通过上限分析证明水平受荷桩桩侧极限土压力数值明显受桩表面的粗糙程度影响,当桩周粗糙时桩侧极限土压力为 $12C_u$,当桩周完全光滑时桩侧极限土压力为 $9C_u$,这都说明桩周粘结力是影响桩侧极限土压力的一个重要因素。

很多学者还进行了水平受荷桩及土体侧移作

用下被动桩侧向极限土压力方面的数值模拟及模型试验研究。对饱和粘土不排水情况,二维数值模拟方面, M. F. Bransby^[4-5]分别揭示了被动桩的 $p-\delta$ 曲线与水平受荷桩 $p-y$ 曲线的区别,以及桩间距与土本构关系对被动桩荷载一位移传递关系的影响, K. Georgiadis等^[6-7]分别研究了水平受荷单排桩及水平受荷双桩(土体位移方向均与桩轴心连线方向垂直)在不同桩间距、不同桩周粘结力系数对桩侧极限土压力以及桩间土体破坏形式的影响等。三维数值模拟研究方面, J. L. Pan等^[8], L. F. Miao等^[9]的研究分别揭示不同条件下被动桩桩侧极限土压力大小分布和影响因素等, K. Georgiadis^[10]对三维条件下水平受荷单排桩(土体位移方向均与桩轴心连线方向垂直)桩侧土压力沿深度方向的变化进行了研究。L. Y. Zhang等^[11]结合三维数值模拟及地基反力系数法等进行了水平受荷刚性桩桩侧土压力及桩土相互作用方面的研究。对无粘性土及砂性土情况, D. Pan等^[12]及 L. Y. Zhang^[13]分别进行了桩侧极限土压力与桩-土相互作用方面的研究。

J. L. Pan等^[14-15]对粘土饱和和不排水情况的被动单桩、单排桩(土体位移方向分别垂直、平行于桩轴心连线)的桩侧极限土压力和群桩效应分别进行了研究, L. Hai等^[16]进行了砂土中的水平受荷桩模型试验直接测得水平受荷刚性短桩的侧向土压力与桩基位移,发现桩周土体中存在泡状的压力楔并对其进行了研究。

土体侧移作用下的群桩,在桩间距较小时土体会在相邻的两桩之间会发生土拱效应,阻止土体从桩间滑出,当桩间距增大到一定程度时土拱效应逐渐减弱,土体会从桩间滑出或产生绕桩破坏。桩间土拱效应是桩土应力迁移的一种现象,即将桩后土体所承受的应力转移到桩土上会引起桩侧土压力的增大。C.Y.Chen等^[17]运用FLAC从土拱效应方面出发,对土体侧移作用下的阻滑桩桩侧土压力的产生机理进行了研究,将阻滑桩桩侧土压力的荷载—位移曲线和土拱效应相联系,分析了应力由土体向桩基的传递。张建勋等^[18]研究了土体侧移作用下群桩中土拱效应的产生机理,并分析了土体性质,群桩以及桩土接触面性质等因素对土拱效应和桩土应力分担比的影响。G. S. Pardo等^[19]进行了基于太沙基活动门试验的土拱试验及数值模拟研究,采用数字图像技术(DIC)和位移传感器获知土的位移场,采用多个测压传感器获取应力分布,比较了Hujeux和Mohr-Coulomb两个土的本构模型在模拟土拱效应方面的能力。

工程中群桩情况比较常见,土体侧移作用下多排群桩中同时存在土拱效应与遮拦效应,桩-土-桩荷载传递规律与群桩效应仍然不清楚,另外土体侧移作用下群桩的桩-土-桩相互作用问题本身具有典型的三维特征,但由于桩土相互作用的主要部位发生在桩周的水平面内,由于桩承台和较深处坚硬土层的约束作用,土体的位移主要发生在水平面内,与水平向位移相比土的竖向位移很小,土体的大小主应变也都发生在水平面内,这样就可以按平面应变模式进行分析,与三维模型相比也可以减小计算工作量,故采用平面应变模型进行研究,首先进行单桩模型研究,并与先前学者的研究成果进行对比,然后在此基础上再进行单排桩和多排群桩的研究。

1 数值分析模型

1.1 模型概况

在地表下5 m深度处(普遍认为在这一深度最接近平面应变状态)取单位厚度土层,按平面应变条件建立模型并进行计算分析。图1为单排桩模型,依据对称条件从单排桩中仅截取一个桩间距建立模型(本文中的桩间距为桩的轴心距,用S表示,

桩直径用D表示,下同),模型总长度(沿土体位移方向)为30 m,单桩计算时仍然采用该模型,但加大桩间距至20D(该桩间距时足可视为单桩情况),双排桩模型布置如图2所示,其中 S_x 为桩间距, S_y 为排间距,双排桩时同样依据对称条件仅截取一个桩间距建立模型(以减小计算量),当桩间距和排间距发生变化时,仅改变桩间距和排间距同时相应调整模型。对桩基周边位置土体网格加密,距桩基较远处网格尺寸逐渐增大,反复进行优化直到进一步增加网格密度对计算结果不再产生影响时为止,单排桩时的网格剖分情况如图3所示(双排桩的网格剖分与单排桩类似,不再单独给出)。



图1 单排桩模型布置

Fig.1 Arrangement of single row piles

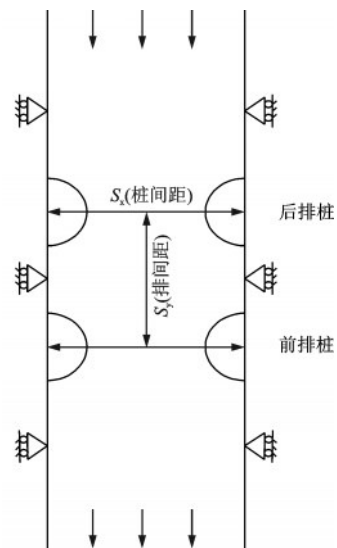


图2 双排桩模型布置

Fig.2 Arrangement of double row piles

分别建立单桩模型、不同桩间距的单排桩模型以及双排桩模型(双排桩模型还有不同的排间距)多个,模型的单元数目分别在 10 752~109 696,节点数目在 17 175~166 431,土体采用摩尔-库仑理想弹塑性模型,按饱和不排水分析,土体参数详见表 1,其中 $E/C_u=750$, $G/C_u=250$ (G 为土体剪切模量, C_u 为土的不排水抗剪强度)。

模型的边界条件如下,模型的上、下两个表面(与竖直方向垂直)的各节点均约束竖向位移,在前、后边界面(前、后两个边界面垂直于土体位移方向)上同时施加相同方向均一速率 10^{-7} m/step(可保证整个施加位移过程中计算能够处于收敛状态,左右两个面均约束垂直于该面方向的位移,如图 1 和图 2 所示)。

1.2 桩基模型

桩基直径 $D=1$ m,桩基两端固定,桩基采用线弹性模型,桩的材料参数按 C30 混凝土考虑,取弹性模量 $E_p=30$ GPa,泊松比取 $\nu=0.17$ 。

1.3 接触面模型

桩土界面上设置接触面,FLAC^{3D}中为无厚度接

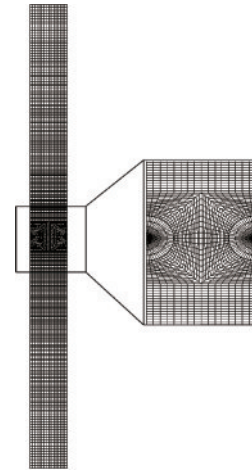


图 3 单排桩的三维有限差分模型

Fig.3 Three dimensional finite difference model of single row piles

触面单元,采用库仑剪切本构模型,接触面单元可以通过接触面节点和实体单元表面之间建立联系,接触面法向方向所受到的力由目标面方位决定,在每个计算步中,首先得到接触面节点和目标面之间的绝对刺入量和相对剪切速度,再利用接触面本构模型来计算法向力和切向力的大小。接触面参数设置见表 2。

表 1 土体参数

Table 1 Soil properties

不排水强度 C_u /kPa	弹性模量 E /MPa	单位重度 γ /($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	泊松比 ν	内摩擦角 φ /($^\circ$)	剪胀角 ψ /($^\circ$)
10	7.5	18	0.495	0	0

表 2 桩土接触面参数

Table 2 Pile-soil interface properties

黏聚力 C /kPa	法向刚度 K_n /($\text{Pa}\cdot\text{m}^{-1}$)	切向刚度 K_s /($\text{Pa}\cdot\text{m}^{-1}$)	抗拉强度 T /kPa	摩擦角 φ /($^\circ$)	剪胀角 ψ /($^\circ$)
10	1×10^9	1×10^9	0	0	0

2 结果与分析

2.1 单桩情况

桩周粘结力对桩侧极限土压力影响较大,桩周粘结力反映了桩周的粗糙程度,一般用桩周粘结力系数 α (α =桩周粘结力/土的不排水强度)来表示, α 的变化范围一般为 0~1.0,桩周不同粗糙程度时的桩侧极限土压力是不同的,当桩周粘结力系数分别

为 $\alpha=0, 0.25, 0.5, 0.75, 1.0, 4.0$ (设置 α 大于 1 是可避免出现桩土脱离现象)时,其 p - δ 曲线如图 4 所示(本文中桩侧土压力-桩土相对位移曲线称为 p - δ 曲线, p 为桩侧土压力, δ 为桩土相对位移量,以下同),可以看出当桩周光滑时($\alpha=0$)桩侧极限土压力为 $10.2C_u$,当桩周粗糙($\alpha=1$)时,桩侧极限土压力为 $12.24C_u$,这与 M. F. Randolph 等^[1]的塑性求解结果($p_u=11.94C_u$)相差在 2.5% 以内,如果进一步增大桩周粗糙程度(或者增大桩周粘结力系数 α),桩侧极限土压力的增加量很小。

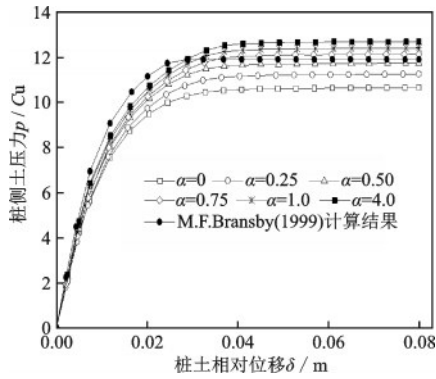


图4 不同桩周粘结力时的 $p-\delta$ 曲线

Fig.4 $P-\delta$ relationship curves for various adhesions around piles

J. L. Pan 等^[8]提出过达到桩侧极限土压力所需要桩土相对位移 δ 是随土的 E/Cu 或 G/Cu 的增大而减小,这一规律与本文计算所得结果是相同的,如图5所示。M. F. Bransby 等^[5]的二维数值模拟结果中(其桩径 $D=2\text{ m}$, $G/Cu=250$)达到极限土压力所需要的桩土相对位移为 $0.03D$,FLAC^{3D}计算结果中(桩径 $D=1\text{ m}$, $G/Cu=250$)达到极限土压力所需要的桩土相对位移为 $0.04D$,两者计算结果是比较接近的,另外 $p-\delta$ 曲线的初始刚度大约为 $p=3.72G(\delta/D)$,这与塑性求解结 $p=4.32G(\delta/D)$ 也是很接近的。通过与以前学者研究结果的对比,说明本文单桩模型计算结果具有较高的可靠性,这为群桩计算奠定了基础。但是以上结果仅限于圆形截面桩基,L. T. Chen 等^[20]对弹塑性土中的方桩进行了研究,其达到极限土压力所需要的桩土相对位移约为 $1.0B$ (B 为方形桩宽度,其 $G/Cu=116$),与圆形截面桩基的计算结果差别较大,说明桩基的截面形状也是重要的影响因素。

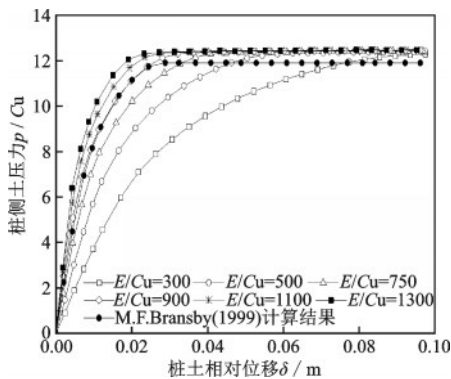


图5 不同 E/Cu 时的 $p-\delta$ 曲线

Fig.5 $P-\delta$ relationship curves for various E/Cu values

2.2 单排桩情况

图6为单排桩时(土体侧移方向垂直于桩轴心连线)桩后土体的大小主应力方向旋转示意图,可以看出离桩基越近,土体位移方向上的主应力越来越小,而在垂直土体位移方向的主应力却越来越大,在桩后附近大主应力的连线便是拱形,形成的土拱可将桩后土体所承受的应力转移到桩体,土拱效应的强弱随桩间距、桩土相对位移量等的改变而变化。

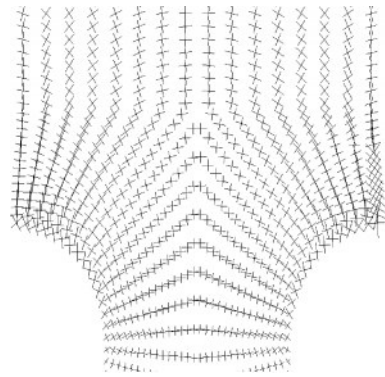


图6 桩后土体主应力旋转示意

Fig.6 Rotation of principal stress direction in soils behind the piles

2.2.1 桩间距对桩土荷载分担比以及桩侧土压力的影响

由于桩后土拱效应随桩土相对位移量增加而变化,在研究桩间距影响时,都按桩侧刚达到极限土压力状态时考虑。图7为单排桩(取桩间距为 $4D$, $D=1\text{ m}$)在桩侧达到极限土压力时,沿土体位移方向不同位置处的应力(沿土体位移方向的应力为 σ_y)分布,可以看出离排桩较远处(如距离排桩轴心连线为 $5D$ 处)的剖面处应力分布均匀,距排桩较近处剖面(如距离排桩轴心连线为 $1D$ 、 $2D$ 处)的应力分布则呈马鞍形,而且靠近桩处应力 σ_y 变大,桩间的 σ_y 变小,这是由于土拱效应引起应力向桩体转移造成的。在图7中各曲线与 x 轴, $x=0\text{ m}$ 和 $x=4\text{ m}$ 所围成的区域面积即为各曲线所在剖面处土体所承受的荷载,排桩后各剖面所承受的荷载与总荷载相近,大约为 290.7 kN/m ,而排桩前 3 m 处土体所承受的荷载则减小为 173.6 kN/m ,从而桩的荷载分担比为 40.3% 。

图8为桩土荷载分担比—桩间距关系曲线,随着桩间距增大桩土荷载分担比减小,当桩间距增大

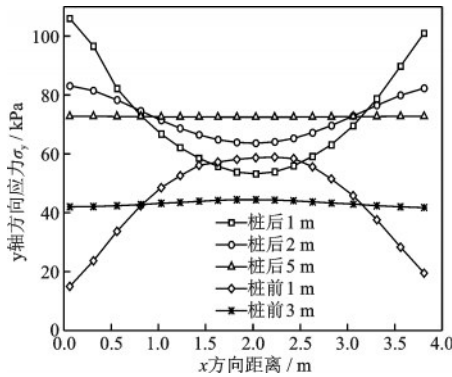


图7 不同位置截面 σ_y 分布曲线
Fig.7 Variation of σ_y at different sections

至 $8D$ 时, 桩的荷载分担比大约降低到 20%, 另外桩周粘结力系数对桩的荷载分担比也有影响, 随着桩周粘结力系数增大, 桩的荷载分担比逐渐升高。

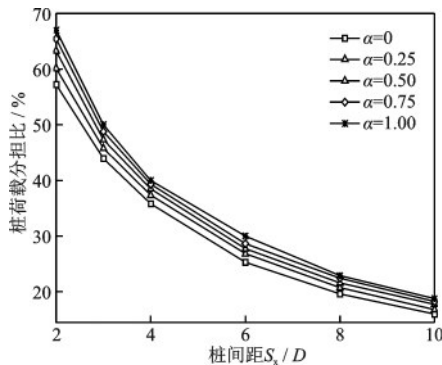


图8 桩土荷载分担比-桩间距关系曲线
Fig.8 Variation of pile bearing ratio with pile spacing

图9为桩侧极限土压力-桩间距关系曲线, 可看出当桩间距大于 $2.5D$ 后, $FLAC^{3D}$ 平面应变计算结果与三维计算结果很接近, 桩间距约为 $2.5D$ 时桩侧极限土压力最低, 当超过 $2.5D$ 以后桩侧极限土压力随着桩间距的增加而增长, 增大至 $6D$ 后基本保持不变, 计算结果与 K. Georgiadi 等^[6] 的平面应变条件下水平受荷单排群桩的计算结果很接近。当桩间距小于 $2.5D$, 平面应变计算中桩侧极限土压力随着桩间距减小而迅速增长, 如在桩间距 $1.1D$ 时, $FLAC^{3D}$ 计算得到桩侧极限土压力为 $p/Cu=20$, K. Georgiadi 等^[6] 的平面应变计算结果也达到 $p/Cu=16$, 如果桩间距进一步减小至桩间距为 $1D$ 时, 桩与桩之间已经没有间隙, 排桩已经形成连续的墙体, 平面应变计算中桩侧极限土压力趋向于无穷大, 这主要是由于平面应变条件限制了土体的竖向位移, 在桩间距较小时土体产生严重挤压造成的, 而三维计算中桩侧极限土压力随桩间距的减小而降低, 当桩间距为 $1D$

时, 桩与桩之间已经没有间隙, 排桩已经形成连续墙体时桩侧极限土压力也不会升高, 因为此时土体已在竖直平面内发生破坏, 这说明在桩间距较小时不适合采用平面应变计算。

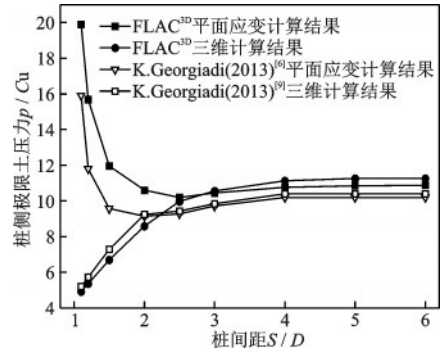


图9 桩侧极限土压力-桩间距关系曲线
Fig.9 Variation of the lateral ultimate earth pressure with pile spacing

2.2.2 桩土相对位移量对桩土荷载分担比及桩侧土压力影响

图10为桩土荷载分担比-桩土相对位移关系曲线, 桩土荷载分担比首先随着桩土相对位移的增加而增大, 达到极大值后基本保持不变。桩间距越大, 桩土荷载分担比越小, 但是达到最大桩土荷载分担比时所需要的桩土相对位移越大。

图11为不同桩间距时的桩侧土压力-桩土相对位移关系曲线 ($p-\delta$ 曲线), 随着桩土相对位移增加桩侧土压力增加至最大后基本保持不变, 在桩间距较小时, 曲线初始刚度大, 达到桩侧极限土压力时所需要的桩土相对位移较小, 这是由于桩间距越小, 桩间土体越难从两桩之间挤出造成的。从图中可以看出当桩间距为 $2D$ 、 $3D$ 时, 在较小的桩土相对位移时达到桩侧极限土压力, 当桩间距增加到 $4D$ 、 $6D$ 、 $8D$ 时达到桩侧极限土压力时所需要的桩土相对位移有所增大, 说明桩间距增大, 充分发挥土拱效应所需的桩土相对位移增大, 另外随桩间距增大桩侧极限土压力也有所增加, 但是在桩间距为 $2D \sim 3D$ 左右时桩侧极限土压力最小, M. F. Bransby 等^[5] 以及 K. Georgiadis 等^[6] 也发现该现象并认为是由于在此桩间距时桩间土体运动方式不同造成的。

2.3 两排桩情况

群桩情况下桩基多为两排及以上, 这里仅进行平行排列的两排桩的研究, 其平面布置仍如图2所示, 两排桩时后排桩一般存在明显的土拱效应(当

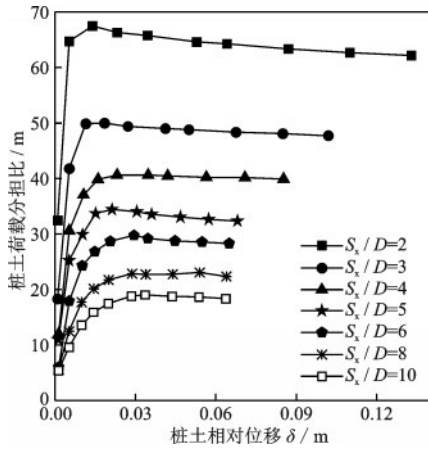


图10 桩土荷载分担比-桩土相对位移关系曲线

Fig.10 Variation of the pile bearing ratio with pile-soil relative displacement

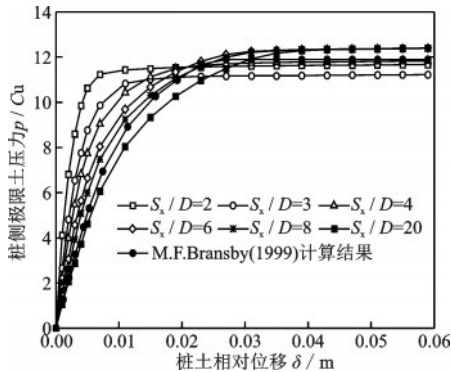


图11 不同桩间距时的 $p-\delta$ 曲线

Fig.11 $P-\delta$ relationship curves for various pile spacings

排间距较小时前排桩的土拱效应可能会消失),同时后排桩和前排桩之间存在遮拦和加筋效应,群桩效应会随桩间距及排间距的改变而变化(桩间距是指同一排桩内桩的间距,排间距指两排桩之间的间距,以下同)。

图12为两排桩时(桩间距为 $4D$,排距分别为 $2D$ 、 $3D$ 、 $4D$ 、 $5D$ 、 $6D$ 、 $8D$)桩侧刚达到极限土压力时的两桩桩间中心线上的法向应力(下面简称为 σ_x),由于后排桩的遮拦作用,前排桩桩间的 σ_x 较后排桩要减小很多,排间距为 $2D$ 、 $3D$ 时桩间的 σ_x 在两排桩间基本呈直线减小,排间距为 $4D$ 、 $6D$ 和 $8D$ 时在两排桩间基本也减小趋势,但在靠近前排桩处局部增大,说明随着排间距的增大,前排桩桩后有较明显的土拱效应发生。

对于两排桩情况,当桩间距分别为 $2D$ 、 $4D$ 、 $6D$ 、 $8D$ 时可分别计算得到后排桩和前排桩的 $p-\delta$ 曲线(不同排间距的),并可以从中得到不同桩间距和排间距时的桩侧极限土压力,从而分别绘制后排桩和

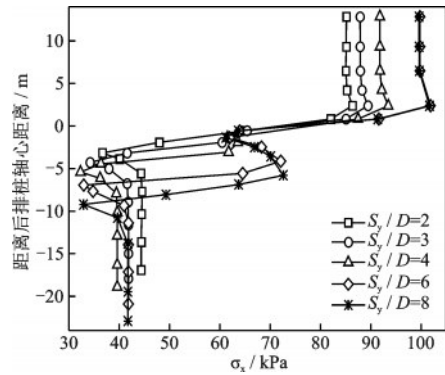


图12 两排桩情况时桩间土体应力分布图

Fig.12 Variation of earth stress of double rows piles

前排桩桩侧极限土压力-排间距关系曲线,分别如图13和图14所示。可看出首先当桩间距发生变化时,在桩间距较小为 $2D$ 时,仅在较小排距例如 $2D$ 、 $3D$ 时后排桩桩侧极限土压力明显降低,而其它排距时后排桩的桩侧极限土压力基本不受前排桩的影响,说明当桩间距较小而排距较大时,前排桩对后排桩加筋影响较小。当桩间距增大至 $4D\sim 8D$,排距为 $2D\sim 6D$ 的后排桩的桩侧极限土压力都有所降低,说明桩间距增大后,前排桩对后排桩产生加筋影响范围增大。

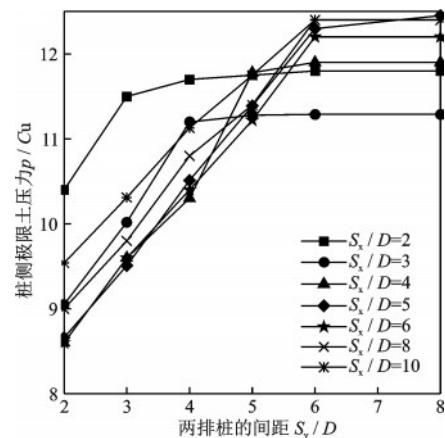


图13 桩侧极限土压力-排间距关系曲线(后排桩)

Fig.13 Variation of the lateral ultimate earth pressure with row spacing (rear row piles)

随着排间距增大后排桩桩侧极限土压力逐渐增大,说明前排桩对后排桩的加筋效应降低,当排间距大于 $6D$ 以后,后排桩的 $p-\delta$ 曲线与单排桩的基本重合,前排桩的加筋效应消失。另外无论是桩间距和排间距的增大,都使得后桩达到桩侧极限土压力所需桩土相对位移量增大。

从图14可以看出,对于前排桩首先在桩间距较

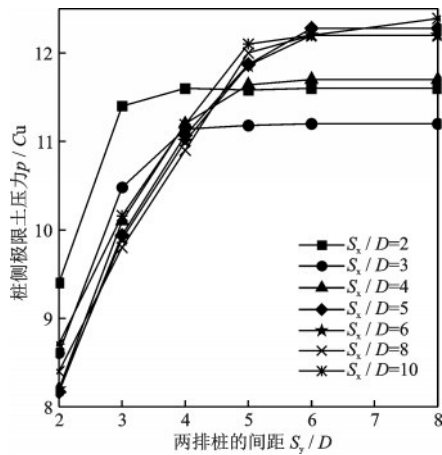


图14 桩侧极限土压力-排间距关系曲线(前排桩)

Fig.14 Variation of the lateral ultimate earth pressure with row spacing (front row piles)

小为 $2D$ 时,这时仅排间距较小为 $2D$ 、 $3D$ 的前排桩桩侧极限土压力明显降低,说明桩间距较小($2D$)时,仅在较小排间距 $2D \sim 3D$ 时后排桩对前排桩产生明显的遮拦效应,而当桩间距增大为 $6D \sim 8D$ 时,排间距为 $2D \sim 6D$ 前排桩都受明显的遮拦效应,说明随着桩间距的增大,后排桩对前排桩产生遮拦作用影响范围增大。

其次当排间距变化时,随着排间距的增大遮拦作用逐渐降低,当排间距大于 $6D$ 以后进一步增大排间距,前排桩的 $p-\delta$ 曲线基本不变且与单排桩的基本重合,此时后桩对前桩几乎没有遮拦作用。另

外无论是桩间距和排间距的增大,都使得前桩达到桩侧极限土压力所需桩土相对位移量增大。

2.4 群桩效应系数

群桩效应系数定义为群桩时的桩侧极限土压力与单桩桩侧极限土压力之比,桩侧极限土压力的群桩效应系数 F_p 按式(1)计算,式中 P_{us} 为单桩极限土压力, P_{uc} 为群桩中某桩基侧向极限土压力。

$$F_p = \frac{P_{uc}}{P_{us}} \quad (1)$$

不同桩间距、排间距时的后排桩和前排桩的群桩效应系数分别见表3和表4。计算结果与单行桩(这里单行桩是指两桩轴心连线与土体位移方向平行的双桩,相当于后排桩及前排桩只有一颗桩时的情况)的三维计算结果^[21]进行了比较,两者结果较一致。还与单排桩(指桩的轴心连线与土体位移方向垂直的的一排桩)的平面应变计算结果进行了对比,平面应变计算的单排桩的群桩效应系数和排间距为 $6D$ 、 $8D$ 时的双排桩计算结果基本一致,这与前面得到的排间距大于 $6D$ 以后双排桩间遮拦、加筋作用基本消失的结论一致。同时还与 J. L. Pan 等^[15]的试验结果进行了比较,可以看出该试验中的单行桩(两桩轴心连线与土体位移方向平行)和单排桩(两桩轴心连线与土体位移方向垂直)在 $3D$ 、 $5D$ 桩间距时的群桩效应系数都较本文平面应变数值模拟结果偏小很

表3 后排桩群桩效应系数

Table 3 Group factors of rear row piles

群桩效应系数	排距 $2D$	排距 $3D$	排距 $4D$	排距 $5D$	排距 $6D$	排距 $8D$	单排桩 (平面应变)	单排桩试验结果 ^[15]
桩距 $2D$	0.85	0.94	0.96	0.96	0.96	0.96	0.950	—
桩距 $3D$	0.74	0.82	0.92	0.92	0.92	0.92	0.920	0.67
桩距 $4D$	0.70	0.78	0.84	0.96	0.97	0.97	0.960	—
桩距 $5D$	0.71	0.78	0.86	0.93	1.00	1.02	1.003	0.81
桩距 $6D$	0.70	0.78	0.85	0.92	0.99	0.99	1.005	—
桩距 $8D$	0.74	0.80	0.88	0.93	1.01	1.01	1.013	—
桩距 $10D$	0.78	0.84	0.91	0.96	1.01	1.01	1.013	—
桩距 $12D$	0.73	0.84	0.97	1.00	1.02	1.02	1.013	—
单行桩(双桩)的三维计算结果 ^[21]	0.86	0.91	0.96	0.97	0.98	0.99	—	—
单行桩试验结果 ^[15]	—	0.77	—	0.67	—	—	—	—

注:表3中的单行桩试验结果和单排桩试验结果都为 J. L. Pan(2002)^[15]的试验结果,单行桩是指桩基轴心连线与土体位移方向平行情况

表4 前排桩群桩效应系数

Table 4 Group factors of front row piles

群桩效应系数	排距 2D	排距 3D	排距 4D	排距 5D	排距 6D	排距 8D	单排桩 (平面应变)	单排桩 试验结果 ^[15]
桩距 2D	0.77	0.93	0.95	0.95	0.95	0.95	0.950	—
桩距 3D	0.70	0.86	0.91	0.91	0.92	0.92	0.920	0.67
桩距 4D	0.67	0.83	0.92	0.95	0.96	0.96	0.960	—
桩距 5D	0.67	0.81	0.90	0.97	1.00	1.00	1.003	0.81
桩距 6D	0.67	0.81	0.90	0.97	0.99	0.99	1.005	—
桩距 8D	0.69	0.80	0.89	0.98	0.99	0.99	1.013	—
桩距 10D	0.71	0.83	0.91	0.98	0.99	1.01	1.013	—
桩距 12D	0.79	0.84	0.96	0.99	1.01	1.02	1.013	—
单行桩(双桩)的 三维计算结果 ^[21]	0.81	0.88	0.92	0.95	0.98	0.98	—	—
单行桩 试验结果 ^[15]	—	0.41	—	0.76	—	—	—	—

注:表中的单行桩和单排桩试验结果都为 J. L. Pan 等^[15]的试验结果

多,造成较大差别的主要原因可能与试验中模型尺寸较小,桩基埋深较浅引起的,另外可能与模型试验中模型桩的截面形状(该试验中采用的是宽度 20 mm、厚度为 6 mm 的不锈钢板)有关。在桩基距和排间距均较大时出现了群桩效应系数稍大于 1 的情况,主要是数值计算误差引起的,不影响结果分析。

3 结 论

(1)单排桩时,随桩间距增大桩土荷载分担比降低,而桩侧极限土压力增大,达到极限土压力时所需要的桩土相对位移增大,达到稳定的桩土荷载分担比所需要的桩土相对位移量增大。在桩间距较小时(当桩间距小于 2D 时),在平面应变条件下,桩间土体会发生过度挤压引起桩侧土极限土压力过度增大,这是平面应变研究的局限性。

(2)双排桩时,在较小桩间距(如桩间距为 2D 时),桩基遮拦、加筋效应影响范围较小,但是随着桩间距的增大(如桩间距为 4D~8D),遮拦和加筋的影响范围增大,而排间距的增大会使遮拦和加筋作用降低,在排间距大于 6D 以后遮拦和加筋效应基本消失,进一步研究应结合三维模型,考虑埋深、桩土相对刚度及桩基截面形状等的影响进行群桩效应研究。

参考文献:

- [1] Randolph M. F., Houlsby G. T. The limiting pressure on a circular pile loaded laterally in cohesive soil [J]. Géotechnique, 1984, 34(4): 613-623.
- [2] Martin C. M., Randolph M. F. Upper-bound analysis of lateral pile capacity in cohesive soil [J]. Géotechnique, 2006, 56(2): 141-145.
- [3] Murff J. D., Hamilton J. M. P-ultimate for undrained analysis of laterally loaded piles [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1993, 119(1): 91-107.
- [4] Bransby M. F. Difference between load-transfer relationships for lateral loaded pile groups: Active P-y or Passive P-δ [J]. Journal of Géotechnical Engineering, 1996, 122(12): 1015-1018.
- [5] Bransby M. F., Springman S. Selection of load transfer functions for passive lateral loading of pile groups. Computers and Géotechnics, 1999, 24: 155-184.
- [6] Georgiadis K., Sloan S. W., Lyamin A. V. Undrained limiting lateral soil pressure on a row of piles [J]. Computers and Geotechnics, 2013, 54: 175-184.
- [7] Georgiadis K., Sloan S. W., Lyamin A. V. Undrained lateral pressure of two side-by-side piles in clay [J]. Géotechnique, 2013, 63(9): 733 - 745, <http://dx.doi.org/10.1680/geot.12.P.030>
- [8] Pan J. L., Goh A. T. C., Wong K. S., et al. Three-dimension analysis of single piles response to lateral soil move-

- ments[J]. *Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2002, 26: 747-758.
- [9] Miao L F, Goh A T C, Wong K S. Three-dimensional finite element analyses of passive pile behaviour[J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2006, 30: 599-613.
- [10] Georgiadis K. Variation of limiting lateral soil pressure with depth for pile rows in clay [J]. *Computers and Geotechnics*, 2014, 62:164-174.
- [11] Zhang L Y, Ahmari S. Nonlinear analysis of laterally loaded rigid piles in cohesive soil[J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2011, DOI: 10.1002/nag.1094.
- [12] Pan D, Smethurst J A, Powerie W. Limiting pressure on a laterally loaded pile in a frictional soil[J]. *Géotechnique Letters*, 2012, 2: 55-60. [http://dx.doi.org/ 10.1680/geolett.12.00007](http://dx.doi.org/10.1680/geolett.12.00007).
- [13] Zhang L Y. Nonlinear analysis of laterally loaded rigid piles in cohesionless soil[J]. *Computers and Geotechnics*, 2009, 36: 718-724.
- [14] Pan J L, Goh A T C, Wong K S, et al. Model tests on single piles in soft clay[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2000, 37: 890-897.
- [15] Pan J L, Goh A T C, Wong K S, et al. Ultimate Soil Pressures for Piles Subjected to Lateral Soil Movements [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2002; 128(6): 530- 535.
- [16] Hai Lin, Lusu Ni, Muhannad T, et al. Interaction between laterally loaded pile and surrounding soil[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2015, 141 (04014119): 1-11.
- [17] Chen C Y, Martin G R. Soil-structure interaction for landslide stabilizing piles[J]. *Computers and Geotechnics*, 2002, 29: 363-386.
- [18] 张建勋,陈福全,简洪钰.被动桩中土拱效应问题的数值分析[J]. *岩土力学*, 2004, 25(2): 174-178.
Zhang J X, Chen F Q, Jian H Y. Numerical analysis of soil arching effects in passive piles[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2004, 25(2): 174 - 178. (in Chinese)
- [19] Padro G S, Saez E. Experimental and numerical study of arching soil effect in coarse sand. *Computers and Geotechnics*. 2014, 57: 75-84.
- [20] Chen L T, Poulos H G. Analysis of pile-soil interaction under lateral loading using infinite and finite elements. *Computers and Geotechnics*. 1993, 15: 189-220.
- [21] 李琳,程青雷,逯建栋,等.被动双桩侧向土压力群桩效应的三维数值研究[J]. *防灾减灾工程学报*, 2016, 36(4): 512-519.
Li L, Chen Q L, Lu J D, et al. Three-dimensional numerical studies on the group effect of the lateral soil pressure along the pile shafts for coupled passive piles [J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2016, 36(4): 512-519. (in Chinese)

(本文责编:周小潭)