

考虑土拱效应的疏排桩支护基坑内力和变形分析

古海东¹, 杨敏²

(1.浙江省交通规划设计研究院, 杭州 310006; 2.同济大学 地下建筑与工程系, 上海 100092)

摘要: 采用同济大学中型岩土离心机进行了2组疏排桩支护基坑的离心机模型试验, 结合三维有限元数值分析探讨了采用规范方法计算疏排桩支护基坑桩身内力与变形的适宜性, 并提出了考虑土拱效应的疏排桩支护基坑桩侧土压力的理论计算方法, 最后建立了考虑土拱效应的疏排桩支护基坑桩身内力和变形的计算模型。研究表明: 对于桩间距与桩径之比为2、3和8的疏排桩支护基坑, 桩间土体无法形成土拱效应; 对于桩间距与桩径之比为4~7的疏排桩支护基坑, 桩间土拱效应明显; 规范法计算得到桩身内力与变形结果要比离心机试验结果偏大, 与规范方法相比, 采用文中提出的计算方法计算疏排桩支护基坑桩身内力与变形更为合理。

关键词: 疏排桩; 基坑; 离心机模型试验; 土拱效应; 内力分析

中图分类号: TU 431

文献标识码: A

Analysis of internal forces and displacement of pit supporting structure with scattered row piles considering soil arching effect

GU Hai-dong¹, YANG Min²

(1. Zhejiang Provincial Institute of Communications Planning Design and Research, Hangzhou 310006, China;

2. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 100092, China)

Abstract: Two groups centrifuge tests of pit foundation supporting with scattered row piles are carried out by Tongji University. Combined with three-dimensional finite element numerical simulation, the suitability that the specification method is used to calculate the internal forces and displacement of pit supporting structure with scattered row piles is explored. In addition, a theoretical calculation method of earth pressure of pile considering soil arching effect is proposed. Finally, the calculation model of internal forces and displacement of scattered row piles considering soil arching effect is created. The results show that, for pit supporting structure with scattered row piles when the ratios of pile spacing and pile diameter are 2, 3 and 8, the soil between piles can't form soil arching effect. In addition, when the ratios are 4~7, the soil arching effect between piles is obvious. The results of pile internal forces and displacement by specification method are larger than the result by centrifuge test. Furthermore, the pile internal forces and displacement of pit supporting structure with scattered row piles calculated by the proposed calculation method are more reasonable.

Key words: scattered row piles; foundation pit; centrifuge model test; soil arching effect; internal force analysis

1 引言

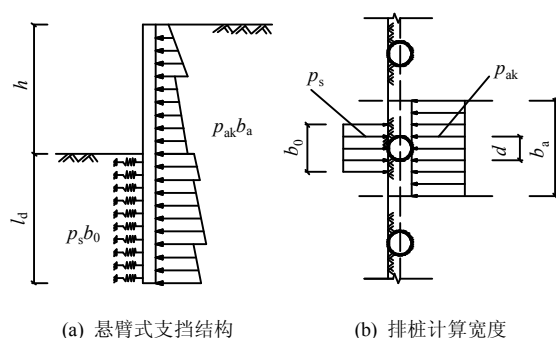
目前, 疏排桩支护基坑内力计算多采用规范法^[1]中推荐的弹性支点法计算, 计算模型简图如图1所示, 规范中的计算模型对单根支护桩上的主动土压力计算宽度 b_a 取为排桩间距 B (图1中的 p_{ak} 、 p_s 分别为单根排桩所承受的主动土压力和被动土反力; b_0 为土反力计算宽度; h 为基坑开挖深度; l_d 为桩嵌固深度)。只有当桩间土体的土压力完全通过

土拱效应传递给排桩时, 排桩计算宽度取桩间距才较为合理, 然而, 实际中土拱效应能否存在以及土拱效应能传递多少土压力给排桩还有待进一步的研究。

土拱效应是由于桩后土体发生不均匀位移条件下而产生应力重新分布和传递的现象。土拱现象最早是由 Terzaghi^[2]于1943年基于活动门试验提出, 随后, Ladanyi^[3]、Wang^[4]、Chen^[5-6]等先后通过理论、试验和数值模拟, 验证了桩间土拱效应的存在,

定性地分析了土拱的存在条件和土体参数对土拱效应的影响。

在路堤桩研究方面, Hewlett 等^[7]根据试验结果, 将路堤中的土拱简化为半圆形球拱, 并认为拱顶、拱脚的土体达到极限状态, 建立了土拱效应的解析方程, 对路堤桩和桩间土的荷载分担比进行了求解; Low 等^[8]在试验中考虑了水平加筋等对土拱效应的影响, 认为由于桩梁的作用, 路堤中的土拱为半圆柱形拱, 并简化为平面问题进行了求解; 曹卫平等^[9-10]通过模型试验与现场实测及其解析解的比较, 认为由于桩刚度远大于桩间土刚度, 在路堤荷载作用下, 桩-土之间存在沉降差, 路堤中出现了明显的土拱效应, 大部分路堤荷载由桩承担, 而桩间土只承担小部分路堤荷载, 这样就可以减小路堤沉降, 提高路堤稳定性, 同时, 土拱效应的发挥程度与桩-土沉降差、路堤高度、桩间距、桩帽大小等因素密切相关, 当路堤较高、桩间距较小、桩帽较大时, 桩体荷载分担比较大。



(a) 悬臂式支撑结构

(b) 排桩计算宽度

图1 排桩内力规范法计算模型^[1]

Fig.1 Calculation model of pile internal forces by specification method

在被动桩的研究方面, Ito 等^[11-12]推导了考虑土拱效应的桩侧土压力解; Bosscher 等^[13]通过试验对砂土边坡中抗滑桩后土拱效应进行了分析, 认为在比较松散的土体中, 并不排除土拱效应的应力传递作用, 当疏排桩嵌固等因素满足桩后土拱效应的形成条件时, 该支护体系可以显著提高边坡的稳定性; 朱碧堂^[14]、周德培^[15]、贾海莉^[16]和蒋良淮^[17]等假定土拱轴线为均布荷载下的合理拱轴线, 表达式为抛物线方程, 并各自根据不同的传力模型, 推导了抗滑桩合理桩间距的计算公式。

对于疏排桩支护基坑中桩间土拱效应研究相关文献较少, 刘斌等^[18]假设疏排桩间土拱轴线为抛物线, 推导了土拱轴线方程, 并根据轴线方程绘制了土拱的空间曲面。然而, 对于不同桩间距的疏排

桩支护基坑桩间土体能否形成土拱效应, 以及土拱效应究竟能传递多少桩间土体土压力到桩身, 目前学术界还没有统一的认识。

本文通过疏排桩支护基坑离心机模型试验, 探讨了桩间土拱效应, 并结合三维有限元数值分析, 提出了考虑土拱效应的桩侧土压力理论计算公式, 建立了考虑土拱效应的桩身内力与变形的计算模型, 并与离心机模型试验结果进行对比分析, 验证了本文所提计算模型的合理性。

2 桩间土拱效应离心机模型试验

2.1 离心机模型试验设计

对于水平受荷桩, 桩间土拱效应的产生一般认为与桩间距、桩的尺寸、桩的刚度、土体强度参数等有关。本文主要针对桩间距进行对比试验。为了更好地观测桩间土体成拱现象, 采用悬臂式支护桩, 桩间不设挡板, 形成凌空面。离心机模型试验在同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室中的 TLJ-150 复合型岩土离心机上进行。试验用土取自上海杨浦区五角场的砂质粉土。

本次离心机试验制备含水率为 40% 的饱和土样, 土样的物理力学性质如表 1 所示。在 1 g (g 为重力加速度) 状态下, 在净空为 700 mm×900 mm×700 mm (高) 的模型箱中, 完成模型制备。

表1 土样的物理力学特性

Table 1 Physico-mechanical properties of soil

相对密度	含水率 /%	密度 /(g/cm ³)	固结不排水强度	
			c/kPa	$\varphi/(^{\circ})$
2.7	40	1.9	7	33.5

在填土前, 模型箱两侧用凡士林粘贴双层聚四氟乙烯薄膜以减小侧壁摩擦。考虑在整个疏排桩基坑组合支护体系当中, 疏排桩以承受侧向土压力为主要荷载, 与土体达到塑性极限状态相比, 疏排桩以弹性变形为主, 且考虑加工和应变测量等因素, 确定采用铝管制作疏排桩模型中所用的桩采用外径为 20 mm, 内径为 14 mm 的铝管 (如图 2 所示), 桩内壁布置弯曲应变片, 桩表面打磨后的外径为 18 mm, 桩长为 400 mm, 弹性模量为 70 GPa。为了测量桩身应变, 先将铝管从中间对半剖开, 然后在铝管内侧粘贴应变片, 图 2 所示为加工完成的模型桩和模型桩定位架。

2.2 试验分组

试验分组如表 2 所示。由于离心加速度值的改变, 模型对应原型尺寸将发生变化, 不同离心加速

度下所对应的试验原型尺寸如表 3 所示, 40 g 时对应原型边坡高为 8 m, 100 g 时对应原型边坡高为 20 m。整个支护结构模型简图如图 3 所示。

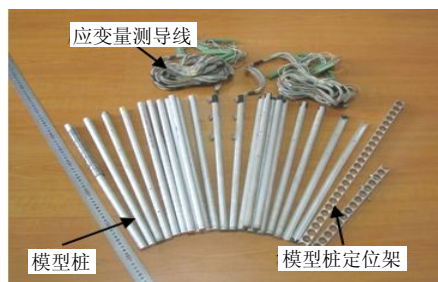


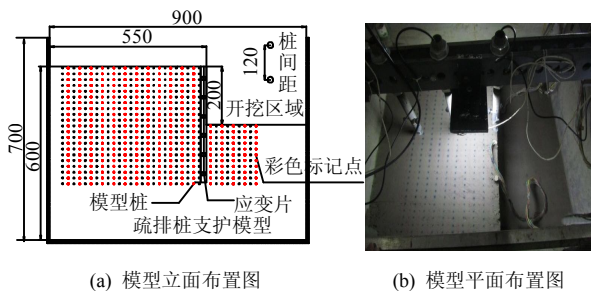
图 2 模型桩示意图

Fig.2 Picture of model piles

表 2 离心机模型试验结果

Table 2 Results of centrifuge model tests

试验 编号	桩间距 / mm	c / kPa	$\phi / (^{\circ})$	基坑原型 高度 / m	最大离心 加速度 / g
1	120	7.25	33.92	6	30
2	80	7.78	33.51	10	50



(a) 模型立面布置图

(b) 模型平面布置图

图 3 疏排桩支护模型 (单位: mm)

Fig.3 Centrifuge model of scattered row piles(unit: mm)

表 3 加速度与原型尺寸关系

Table 3 Relationship between acceleration and prototype size

加速度 / g	边坡高度 H / m	疏排桩长度 L / m	疏排桩直径 D / m
1	0.2	0.40	0.02
10	2.0	4.00	0.20
20	4.0	8.00	0.40
30	6.0	12.00	0.60
40	8.0	16.00	0.80
50	10.0	20.00	1.00

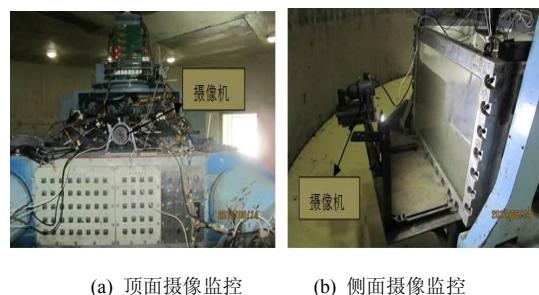
2.3 试验步骤

试验时, 将制备好的离心机模型吊入离心机吊篮, 进行模型固结试验 (模型比例尺为 60), 试验开始后离心加速度以 10 g 为一级, 每级加速度下运转 3 min, 最后在 60 g 的离心加速度下进行固结试验, 固结完成的判断标准为模型箱中的孔隙水压力消散 95%以上。固结结束后将模型箱吊出, 开挖成高度为 200 mm、坡角为 90° 的竖直基坑, 拆开模型

箱侧壁, 在模型基坑侧表面用长度为 1 mm 的彩色大头针布置标记点, 如图 3 所示。标记点布置完毕后重新组装模型箱, 然后将模型箱吊入离心机吊篮。待模型箱中的传感器以及桩身应变片等接线通道调试完毕后, 开启离心机, 先在 10 g 加速度下运转 3 min, 观看离心机是否运转正常, 一切正常后从 30 g 离心加速度开始以每 5 g 为一级, 每级加速度下运转 15 min, 如果模型在这一级加速度下破坏, 或者在期间的任意加速度下破坏, 试验即告结束。

2.4 试验结果

通过在离心机模型箱顶面和侧面安装摄像机, 如图 4 所示, 可以实时监控模型在离心机不同加速度下的变形形态, 从而判断模型发生失稳破坏时的最大离心加速度, 文中提到的 2 组疏排桩支护基坑模型失稳破坏时的形态如图 5、6 所示, 桩间土拱形态如图 7 所示。

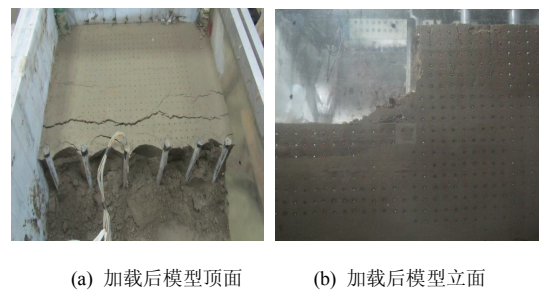


(a) 顶面摄像监控

(b) 侧面摄像监控

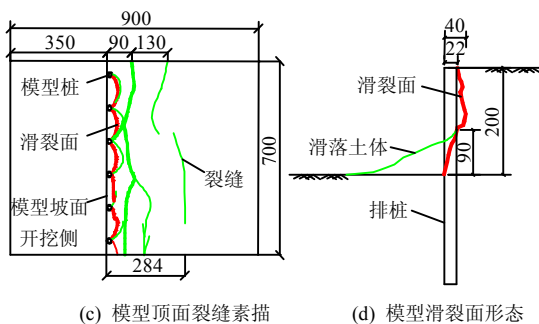
图 4 摄像机动态监控系统

Fig.4 Dynamic monitoring system by camera



(a) 加载后模型顶面

(b) 加载后模型立面



(c) 模型顶面裂缝素描

(d) 模型滑裂面形态

图 5 第 1 组模型破坏形态 (单位: mm)

Fig.5 Failure mode of the first group model (unit: mm)

由图 5 可知: 对于 $B/D=6$ 的疏排桩支护模型, 滑裂面整体为波浪线, 在模型桩间近似拱形分布, 最大拱高约 42 mm, 并且拱形破坏面后面形成完整的拱形裂缝, 裂缝拱高约为 60 mm。

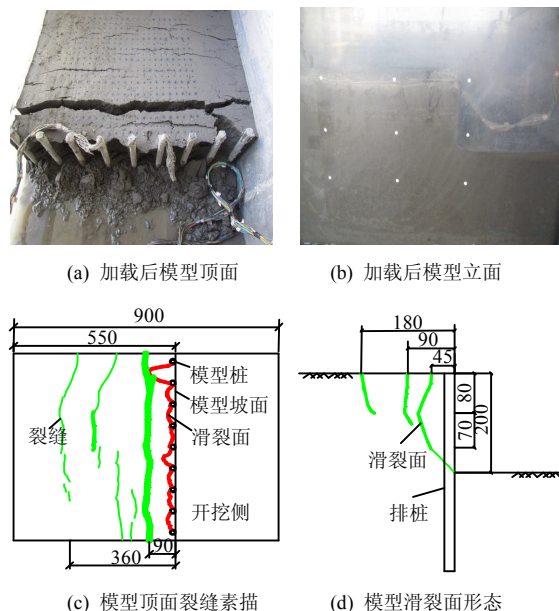


图 6 第 2 组模型破坏形态 (单位: mm)

Fig.6 Failure mode of the second group model (unit: mm)

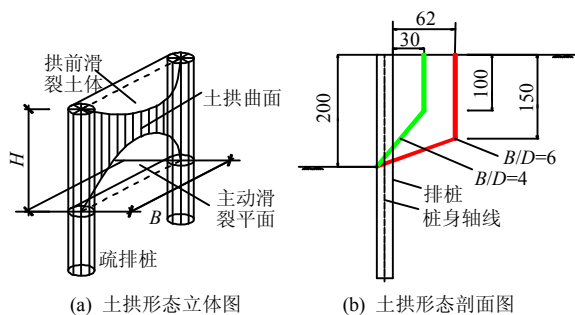


图 7 土拱形态试验结果

Fig.7 Forms of soil arching

由图 6 可以看出: 对于 $B/D=4$ 的疏排桩支护模型, 滑裂面整体为波浪线, 在模型桩间近似拱形分布, 拱高为 10~30 mm, 在模型箱右侧相邻两模型桩间土体拱形塌落面与之后的主裂缝相贯通, 此处最大拱高约为 90 mm, 此处土体破坏形态与其他桩间土体相比较发生突变的主要原因, 可能是模型箱右侧壁上粘贴的聚四氟乙烯薄膜在模型加载中发生破坏和脱落, 使模型与模型箱侧壁的摩擦力增大, 边界效应增加所导致的。

结合图 5、6 可知, 离心机模型试验已经证实对于 $B/D=6$ 和 $B/D=4$ 的疏排桩支护基坑, 桩间土体能形成明显的土拱效应。接着需要探讨的是有土拱效

应存在时桩侧土压力与没有土拱效应存在时究竟有何差别。

根据换算式 (1) 可以将模型桩桩身弯曲应变读数换算出模型桩在不同离心加速度下的对于原型桩的桩身弯矩, 如图 8 所示。

$$M = \frac{EI\varepsilon}{y} = \frac{E\pi(D^4 - d^4)n^3\varepsilon}{64D/2} \quad (1)$$

式中: EI 为模型桩的抗弯刚度; D 、 d 分别为模型桩外径和内径; n 为离心加速度值。

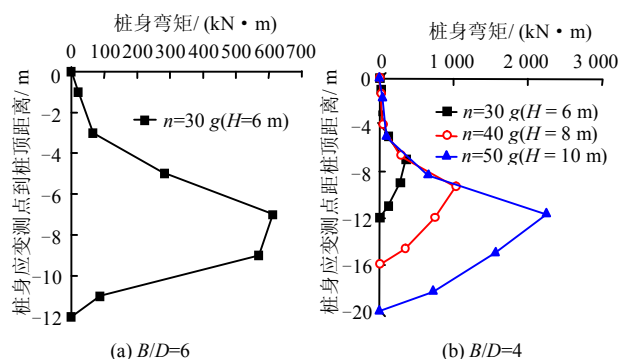


图 8 桩身弯矩图

Fig.8 Bending moment diagrams of pile

由于离心机模型试验组数有限, 对于其他桩间距的疏排桩支护基坑能否形成土拱效应, 以及桩侧土压力的大小如何, 还需要借助三维有限元数值模拟进行补充分析。

3 桩间土拱效应数值分析

3.1 有限元模型的建立

本节中通过 ABAQUS 有限元软件, 对模型试验进行了补充分析, 共进行了 6 组有限元数值模拟, 对应的桩间距为 $B/D=2, 3, 4, 5, 6, 7, 8$ 。为了验证有限元模型的可靠性, 以 $B/D=4$ 为例, 将有限元软件关于桩身内力和变形以及地表沉降的计算结果与文中的离心机模型试验进行对比分析。

有限元模拟中模型尺寸、模型参数 (如表 4 所示, 其中土体抗剪强度指标采用离心模型试验 1、2 的三轴试验结果的平均值) 和加载工况与离心机模型试验保持一致, 为了减少计算量, 在三维有限元数值模拟中, 根据对称性选取相邻 3 根桩为模型计算宽度 (见图 9), 模型桩采用壳单元模拟 (壳的厚度和离心机模型试验中的模型桩一致)、土体采用 C3D8 实体单元模拟, 桩和土体采用面-面接触形式 (切线方向采用罚函数接触, 摩擦系数为 $\tan(0.75\varphi)$, 法向方向采用硬接触)。

模型计算步骤为：①进行地应力平衡，目的是保留自重应力场，消除模型在自重下产生的位移，表示模型固结已经完成；②在 1g 重力荷载作用下，对模型进行开挖（ABAQUS 中采用生死单元来控制模型开挖工况），用来模拟离心机试验中的停机开挖；③分别给模型施加 $n=30g$ 、 $40g$ 和 $50g$ 的重力荷载，用来模拟离心机模型试验中施加的 30g、40g 和 50g 离心加速度（如图 9 所示）。为了与离心机模型试验加载时间保持一致，有限元加载中每级荷载下运行 600 s 以模拟离心机试验中每级荷载加载 10 min，在有限元模拟中模型失稳的判断依据为：在某一级荷载下，基坑坡顶的水平位移不收敛，则认为模型在该级荷载作用下已经失稳（见图 10）。

表 4 有限元模型计算参数
Table 4 Calculation parameters of FEM model

材料	E/MPa	ν	c/kPa	$\phi/(\text{^\circ})$	$\gamma/(\text{kN/m}^3)$
桩	70 000	0.20			27
土体	30	0.35	7.5	33.7	19

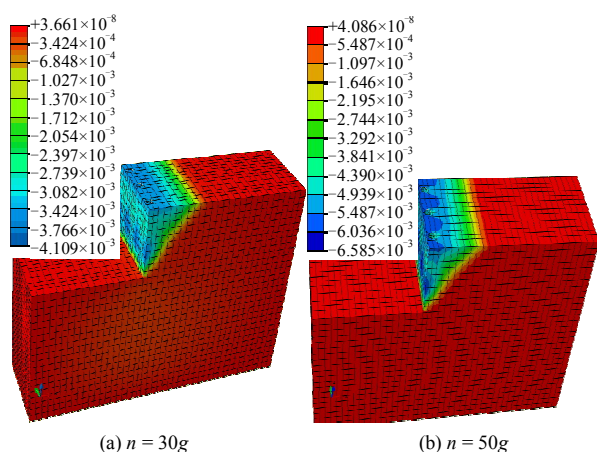


图 9 有限元模拟结果 ($B/D=4$)

Fig.9 The results of FEM

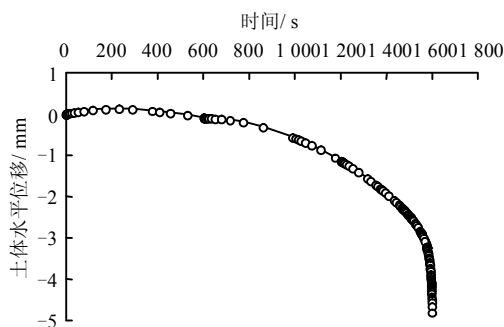


图 10 坡顶土体水平位移随时间变化曲线

Fig.10 Horizontal displacements of top soil versus time

图 10 为基坑坡顶水平位移随加载时间的变化曲线，由图可知，当加载到 50g 时（0~1 s 为地应

力平衡分析步；1~2 s 为基坑开挖分析步；3~602 s 为加载 30g 分析步；603~1 202 s 为加载 40g 分析步；1 203~1 802 s 为加载 50g 分析步），在荷载不变的情况下坡顶水平位移持续增加，位移不收敛，因此，判断在 50g 荷载下模型已经失稳，这一结论与离心机模型试验中加载到 50g 的离心加速度下模型破坏是一致的。

3.2 有限元模型可靠性验证

图 11 为有限元计算得到的桩身弯矩与离心机模型试验得到的模型桩身弯矩对比曲线。由图可知，通过有限元数值计算得到的桩身弯矩沿桩身分布规律以及最大弯矩发生位置都与离心机模型试验结果一致，有限元数值计算得到的桩身最大弯矩虽然比离心机试验结果偏大，但最大误差仅为 19%，并且，随着离心加速度的增加，有限元计算结果与离心机模型试验结果越接近。

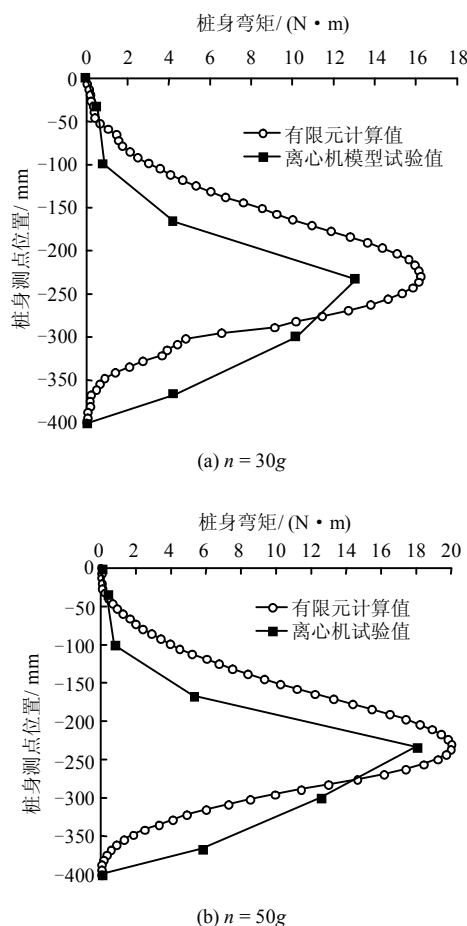


图 11 有限元和离心机试验得到的桩身弯矩 ($B/D=4$)

Fig.11 Contrast curves of pile bending moment by FEM and centrifuge test

综上所述，通过模拟地表沉降以及桩身弯矩与离心机模型试验的比较分析可知，本文建立的疏排桩支护结构有限元模型是可靠的。

3.3 有限元分析结果

图 12 为 $B/D=4$ 的疏排桩支护结构在离心加速度 $n=50g$ 时距离地表深度为 40 mm 处桩间土体的水平应力分布曲线。从图中可以看出, 桩间中心处土体的水平应力值最小, 桩身周围范围内的土体水平应力值最大, 这是因为桩间土体相对桩径范围内土体产生了较大的位移, 由于不均匀位移的出现, 桩间土体产生了土拱效应, 将桩间土体的侧向压力通过土体颗粒的摩擦传递到桩径范围内土体上, 再传到支护桩, 形成了应力拱。在桩后 5 mm 处侧向土压力主要由桩径范围内土体承担, 桩间土体承担的荷载非常小, 接近于 0; 距离排桩越远处, 应力拱越不明显, 在桩后 45 mm 处应力拱已基本消失。

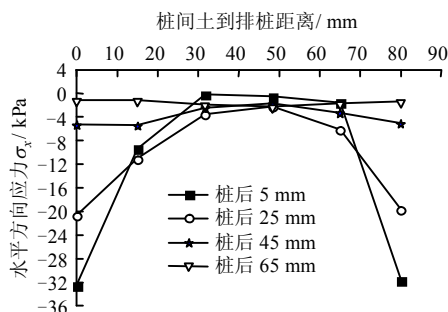


图 12 桩间土体水平应力 ($n=50g$)

Fig.12 Horizontal stresses of soil among piles ($n=50g$)

图 13 为有限元软件计算得到 $B/D=2\sim 8$ 的疏排桩支护结构在接近失稳破坏时的水平位移云图, 从图中可以看出, 对于 $B/D=4\sim 7$ 的疏排桩支护结构, 桩间土体能观察到明显的土拱形态; 对于 $B/D=2$ 、3 和 8 的疏排桩支护结构, 桩间土体没有明显的土拱形态。

4 考虑土拱效应的桩侧土压力计算

图 14 为 $B/D=2$ 和 3 的疏排桩支护基坑桩侧土压力实际值 (由上文中的数值模拟计算得出) 与朗肯主动土压力计算值的对比曲线。

从图中可以看出, 当桩间土体无土拱效应存在时, 桩身承担的土压力荷载近似等于朗肯主动土压力, 同时也进一步说明了当 $B/D=2$ 和 3 时桩间土体无土拱效应存在。

当 $B/D=4\sim 7$ 时, 疏排桩支护基坑桩间土能形成明显的拱效应, 通过土拱效应将桩间土的土压力传递给桩身, 因此, 有土拱效应存在时, 桩身实际承担的土压力荷载要大于没有土拱效应存在时桩侧土压力荷载。此时采用朗肯主动土压力理论计算桩身承担的土压力荷载显然已不合适, 计算结果明显偏小。

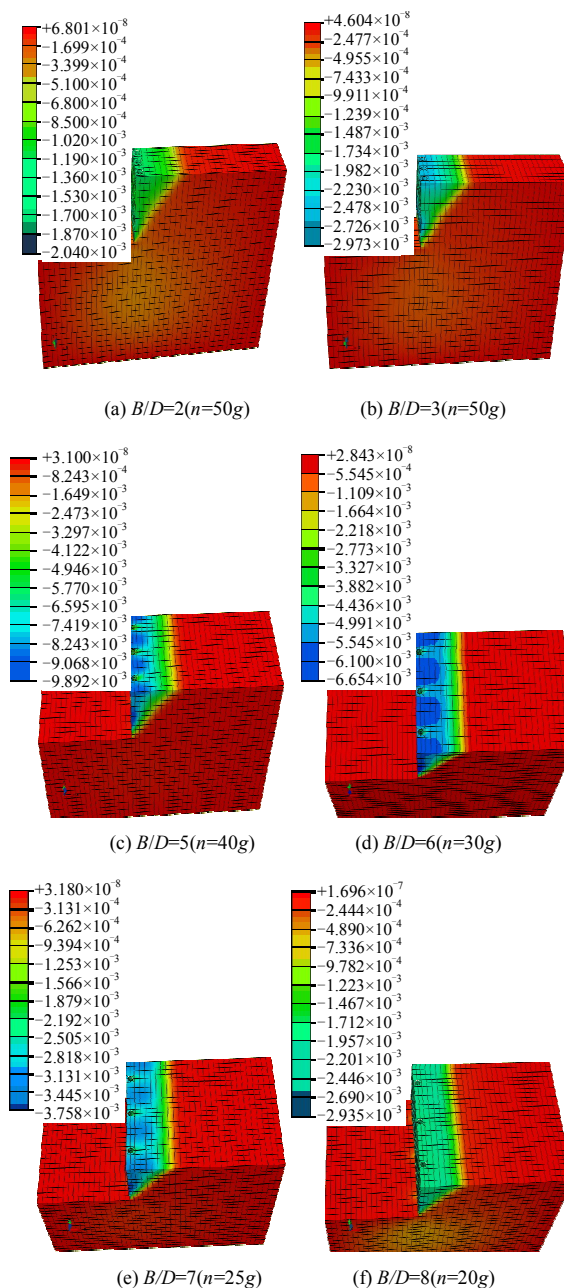


图 13 水平位移云图 (单位: mm)

Fig.13 Nephograms of horizontal displacements (unit: mm)

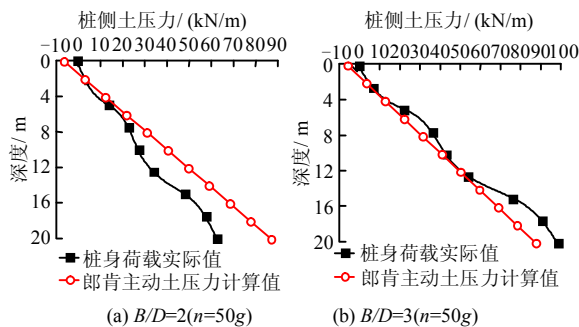


图 14 桩侧土压力

Fig.14 Earth pressure along pile

Ito^[12]基于土的塑性力学给出了考虑土拱效应的被动桩桩侧土压力的解析解, 然而 Ito 的分析结

果能否直接用于计算疏排桩支护基坑中的排桩桩侧土压力有待验证。以 $B/D=6$ 的疏排桩支护基坑为例, 图 15 给出了桩侧土压力实际值与 Ito 方法以及朗肯主动土压力计算结果对比曲线, 从图可以看出, 桩侧土压力实际值要明显大于朗肯主动土压力理论计算结果, 同时又明显小于 Ito 计算结果, 说明 Ito 计算方法不能用来直接计算疏排桩支护基坑有土拱效应存在时的桩侧土压力。

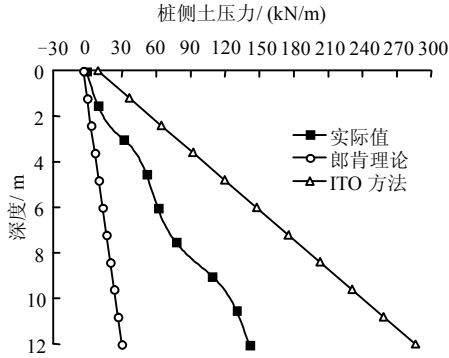


图 15 桩侧土压力 ($B/D=6$, $n=30g$)

Fig.15 Earth pressure along pile ($B/D=6$, $n=30g$)

为了得到考虑土拱效应的疏排桩支护基坑桩侧土压力的理论解, 可对 Ito 的计算方法进行修正, 具体方法如下:

图 16 为 Ito 等^[11]基于土体塑性力学求解桩侧土压力的计算模型简图。Ito 在求解时, 假定的边界条件为隔离体 AEE'A' 在 AA' 处的应力 σ_x 等于朗肯主动土压力, 即

$$\sigma_x = \gamma z N_\phi^{-1} - 2c N_\phi^{-1/2} \quad (2)$$

其中, $N_\phi = \tan^2(\pi/4 + \phi/2)$, 得到的桩侧土压力计算公式为

$$p(z) = cD_1 \left(\frac{D_1}{D_2} \right)^{(N_\phi^{1/2} \tan \phi + N_\phi - 1)} \left[\frac{1}{N_\phi \tan \phi} \left\{ \exp \left(\frac{D_1 - D_2}{D_2} N_\phi \cdot \tan \phi \tan \left(\frac{\pi}{8} + \frac{\phi}{4} \right) \right) - 2N_\phi^{1/2} \tan \phi - 1 \right\} + \frac{2 \tan \phi + 2N_\phi^{1/2} + N_\phi^{-1/2}}{N_\phi^{1/2} \tan \phi + N_\phi - 1} \right] - c \left\{ D_1 \frac{2 \tan \phi + 2N_\phi^{1/2} + N_\phi^{-1/2}}{N_\phi^{1/2} \tan \phi + N_\phi - 1} - 2D_2 N_\phi^{-1/2} \right\} + \frac{\gamma z}{N_\phi} \left\{ D_1 \times \left(\frac{D_1}{D_2} \right)^{N_\phi^{1/2} \tan \phi + N_\phi - 1} \cdot \exp \left(\frac{D_1 - D_2}{D_2} N_\phi \tan \phi \tan \left(\frac{\pi}{8} + \frac{\phi}{4} \right) \right) - D_2 \right\} \quad (3)$$

式中: c 和 ϕ 为土体的黏聚力与内摩擦角; D_1 和 D_2

分别为桩间中心距和桩间净距; γ 为土体重度; z 为土体计算深度。

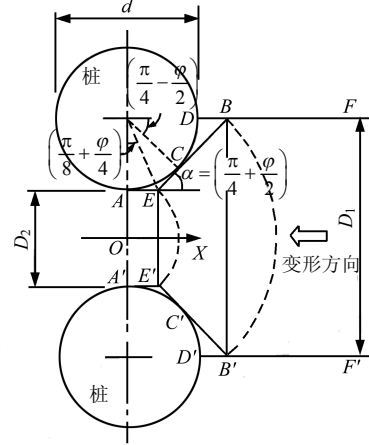


图 16 桩间土的塑性变形特征

Fig.16 State of plastic deformation of soil among piles

而对于疏排桩支护基坑, 有土拱效应存在时, 桩间土体的土压力大部分通过土拱传递到桩身, AA' 处的实际土压力应小于朗肯主动土压力, 因此, 本文通过假定 AA' 处的实际土压力为朗肯主动土压力乘以一个经验折减系数 k (k 值的大小可由疏排桩支护基坑桩侧土压力实际值与本文修正方法进行比较分析确定), 即 Ito 计算方法的边界条件可修正为

$$\sigma_x = k(\gamma z N_\phi^{-1} - 2c N_\phi^{-1/2}) \quad (4)$$

将此边界条件代入 Ito 原方法方程中可得到桩侧土压力的修正计算公式为

$$p'(z) = cD_1 \left(\frac{D_1}{D_2} \right)^{(N_\phi^{1/2} \tan \phi + N_\phi - 1)} \left[\frac{1}{N_\phi \tan \phi} \left\{ \exp \left(\frac{D_1 - D_2}{D_2} N_\phi \cdot \tan \phi \tan \left(\frac{\pi}{8} + \frac{\phi}{4} \right) \right) - 2N_\phi^{1/2} \tan \phi - 1 \right\} + \frac{2 \tan \phi + 2N_\phi^{1/2} + N_\phi^{-1/2}}{N_\phi^{1/2} \tan \phi + N_\phi - 1} \right] - c \left\{ D_1 \frac{2 \tan \phi + 2N_\phi^{1/2} + N_\phi^{-1/2}}{N_\phi^{1/2} \tan \phi + N_\phi - 1} - 2kD_2 N_\phi^{-1/2} \right\} + \frac{k\gamma z}{N_\phi} \left\{ D_1 \times \left(\frac{D_1}{D_2} \right)^{N_\phi^{1/2} \tan \phi + N_\phi - 1} \cdot \exp \left(\frac{D_1 - D_2}{D_2} N_\phi \tan \phi \tan \left(\frac{\pi}{8} + \frac{\phi}{4} \right) \right) - D_2 \right\} + 2(1-k)D_1 \cdot \left(\frac{D_1}{D_2} \right)^{N_\phi^{1/2} \tan \phi + N_\phi - 1} N_\phi^{-1/2} \exp \left(\frac{D_1 - D_2}{D_2} N_\phi \tan \phi \tan \left(\frac{\pi}{8} + \frac{\phi}{4} \right) \right) \quad (5)$$

图 17 为 $B/D=4 \sim 7$ 的疏排桩支护基坑临近失稳破坏时的桩侧土压力实测值与 Ito 方法以及本文提

出的 Ito 修正计算方法对比关系曲线。

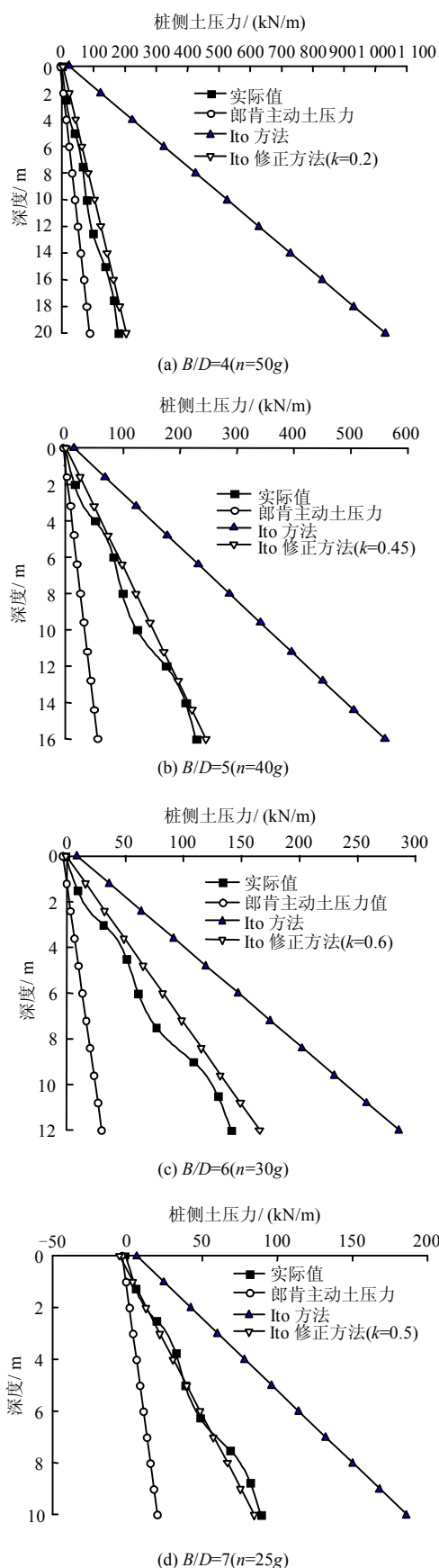


图 17 桩侧土压力 (不同计算方法比较结果)
Fig.17 Earth pressure along pile (results of different calculation methods)

由图可知,采用修正后的 Ito 计算方法得到的桩侧土压力与实际结果比较吻合,对于本文研究的砂质粉土,经验折减系数 k 的取值范围为 $0.2 \sim 0.6$,平均值约为 0.4 ,当 $B/D=6$ 时, k 取值最大,此时土拱效应发挥最充分。

5 桩身内力与变形计算

图 18 为疏排桩支护基坑桩身内力与变形计算模型简图。

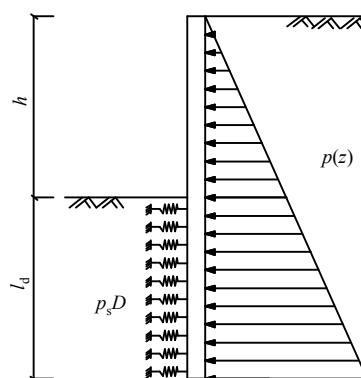


图 18 排桩内力计算模型
Fig.18 Calculation model of row piles internal forces

其中 p_s 值取法同规范^[1]一致,当 $B/D < 3$ 或者 $B/D > 7$ 时桩间土体无土拱效应产生, $p(z)$ 值可根据郎肯主动土压力理论求解,当 $B/D=4 \sim 7$ 时桩间土拱效应明显, $p(z)$ 值可根据本文提出的 Ito 修正方法求得 (如公式 (5) 所示)。再根据有限差分方法即可求得桩身内力与变形。

图 19 为根据本文提出的计算模型得出的 $B/D=2, 4, 6$ 和 8 的疏排桩支护基坑桩身内力和变形与规范法以及离心机试验结果的对比曲线,从图中可以看出,本文提出的计算模型得到的计算结果较规范法更为合理。

6 结 论

- (1) 采用规范法计算得到疏排桩支护基坑桩身内力与变形比试验结果偏大,计算方法偏保守。
- (2) 对于 $B/D=2, 3$ 和 8 的疏排桩支护基坑,桩间土体无法形成土拱效应,此时排桩桩侧土压力近似等于郎肯主动土压力。
- (3) 对于 $B/D=4 \sim 7$ 的疏排桩支护基坑,由于桩间土拱效应的存在,桩身实际承担的土压力要明显大于郎肯主动土压力,此时可采用本文提出的修正 Ito 方法计算桩身实际承担的土压力荷载。
- (4) 在计算疏排桩支护基坑桩身内力与变形时,

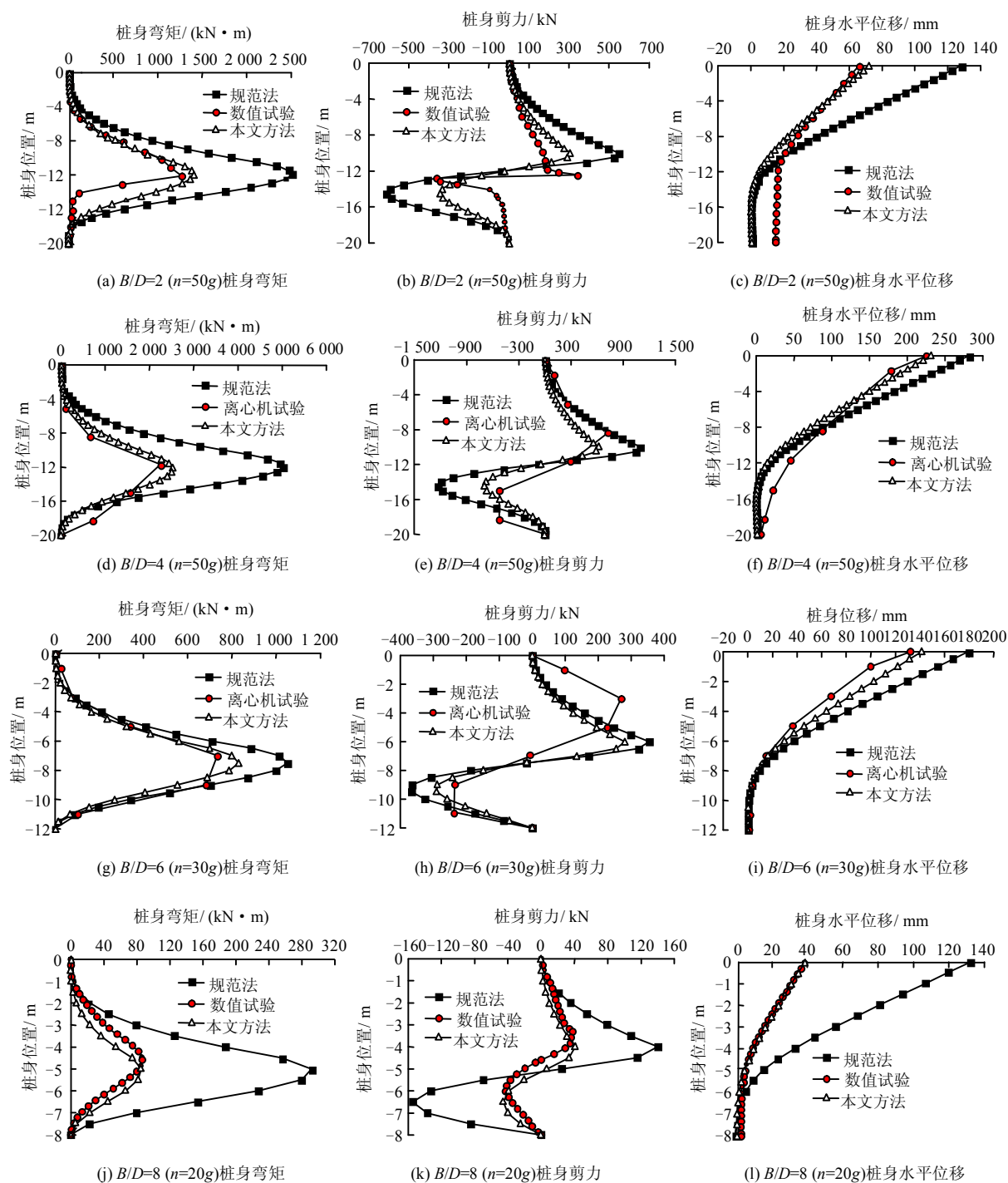


图 19 疏排桩支护基坑桩身内力和变形与桩身位置的关系

Fig.19 Relations of internal forces and displacements of pile with pile locations

本文提出的计算模型得到的计算结果较规范法更为合理。

(5) 本文研究不包含支护桩外侧另设水泥土帷幕的情况。尽管高地下水位或软土地区的基坑工程中排桩外侧一般设水泥土帷幕会有利于增强土拱效应,但也会使该问题的研究更复杂。

参考文献

[1] 建设部. JGJ120—2012 建筑基坑支护技术规程[S]. 北

京: 建筑工业出版社, 2012.

[2] TERZAGHI K. Theoretical soil mechanics[M]. New York: John Wiley & Sons, 1943.

[3] LADANYI B, HOYAUX B. A study of the trap door problem in a granular mass[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1969, 6(1): 1—14.

[4] WANG W L, YEN B C. Soil arching in slopes[J]. *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, 1974, 100(GT1): 61—78.

- [5] CHEN C Y, MARTIN G R. Soil-structure interaction for landside stabilizing piles[J]. **Computers and Geotechnics**, 2002, 29(3): 363—386.
- [6] MARTIN G R, CHEN C Y. Response of piles due to lateral slope movement[J]. **Computers and Structures**, 2005, 83(8—9): 588—598.
- [7] HEWLETT W J, RANDOLPH M F. Analysis of piled embankments[J]. **Ground Engineering**, 1988, 21(3): 12—18.
- [8] LOW B K, TANG S K, CHOA V. Arching in piled embankments[J]. **Journal of Geotechnical Engineering, ASCE**, 1994, 120(11): 1917—1938.
- [9] 曹卫平, 陈仁朋, 陈云敏. 桩承式加筋路堤土拱效应试验研究[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(3): 436—441.
CAO Wei-pin, CHEN Ren-peng, CHEN Yun-min. Experimental investigation on soil arching in piled reinforced embankment[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2007, 29(3): 436—441.
- [10] 曹卫平, 凌道盛, 陈云敏. 刚性桩加固高速公路软基土拱效应现场试验研究及其与解析解的比较[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(10): 1576—1581.
CAO Wei-ping, LING Dao-sheng, CHEN Yun-min. Field test on soil arching of highway embankments reinforced with rigid piles and their comparison with current analytical methods[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2007, 29(10): 1576—1581.
- [11] ITO T, MATSUI T. Methods to estimate lateral force acting on stabilizing piles[J]. **Soils and Foundations**, 1975, 15(4): 43—59.
- [12] ITO T. Extended design method for multi row stabilizing piles against landslide[J]. **Soils and Foundations**, 1982, 22(1): 1—13.
- [13] BOSSCHER J, GRAY H. Soil arching in sandy slopes[J]. **Journal of Geotechnical Engineering, ASCE**, 1986, 112(6): 626—645.
- [14] 朱碧堂, 温国炫, 刘一亮. 基坑开挖和支护中土层拱效应的理论分析[J]. 建筑技术, 2002, 33(2): 97—98.
ZHU Bi-tang, WEN Guo-xuan, LIU Yi-liang. Theoretical analysis of soil in excavation and retaining works[J]. **Architecture Technology**, 2002, 33(2): 97—98.
- [15] 周德培, 肖世国, 夏雄. 边坡工程中抗滑桩合理桩间距的探讨[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(1): 132—135.
ZHOU De-pei, XIAO Shi-guo, XIA Xiong. Discussion on rational spacing between adjacent anti-slide piles in some cutting slope projects[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2004, 26(1): 132—135.
- [16] 贾海莉, 王成华, 李江洪. 基于土拱效应的抗滑桩与护壁桩的桩间距分析[J]. 工程地质学报, 2004, 12(1): 98—103.
JIA Hai-li, WANG Chen-hua, LI Jiang-hong. Analysis of pile spacing between anti-sliding piles and pertaining piles in accordance with soil arching effect[J]. **Journal of Engineering Geology**, 2004, 12(1): 98—103.
- [17] 蒋良潍, 黄润秋, 蒋忠信. 黏性土桩间土拱效应计算与桩间距分析[J]. 岩土力学, 2006, 27(3): 445—450.
JIANG Liang-wei, HUANG Run-qiu, JIANG Zhong-xin. Analysis of soil arching effect between adjacent piles and their spacing in cohesive soils[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 27(3): 445—450.
- [18] 刘斌, 杨敏, 杨志银, 等. 疏排桩-土钉墙组合基坑支护结构设计与实践[J]. 土木工程学报, 2010, 43(10): 106—114.
LIU Bin, YANG Min, YANG Zhi-yin, et al. Design and practice of composite structure with scattered row piles and soil nailing for pit protection[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2010, 43(10): 106—114.