

DOI: 10.11779/CJGE201402002

不同围护结构变形模式对坑外深层土体位移场影响的对比分析

郑刚^{1,2}, 邓旭^{1,2}, 刘畅^{1,2}, 刘庆晨^{1,2}

(1. 滨海土木工程结构与安全教育部重点实验室(天津大学), 天津 300072; 2. 天津大学建筑工程学院, 天津 300072)

摘要: 对某深基坑开挖全过程中围护桩的水平位移进行了实测, 由于水平支撑提供的支撑刚度不同, 不同位置处的围护桩可产生不同的水平位移分布模式, 且最大水平位移值也存在明显差别。通过建立考虑土体小应变的有限元模型, 针对4种典型围护结构变形模式引起的坑外深层土体位移场变化特点进行分析, 结果表明: 即使围护结构最大水平位移相同, 由于侧移分布模式不同, 基坑外地表和深层土体的竖向及水平位移场均可能存在较大差别, 从而可能对环境产生不同程度的影响。围护结构在内凸型和复合型模式下, 坑外深层土体竖向变形可分为凹槽形沉降区、三角形过渡区和隆起区, 而深层土体水平位移场可分为弓形变形区、变形过渡区以及悬臂形变形区; 悬臂型模式下坑外深层土体竖向位移场只存在三角形变形区和隆起区, 而水平位移场则全部呈悬臂形; 踢脚型模式下的竖向位移和水平位移影响范围均为最大。在实际工程中除控制围护结构最大变形值外, 尚应根据周围环境特点合理控制围护结构变形模式, 并尽可能避免出现踢脚模式变形。

关键词: 围护结构; 变形模式; 位移场; 变形特点; 影响范围

中图分类号: TU470 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2014)02-0273-13

作者简介: 郑刚(1967-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 从事土力学及岩土工程教学与科研工作。E-mail: zhenggang1967@163.com。

Comparative analysis of influences of different deformation modes of retaining structures on displacement field of deep soils outside excavations

ZHENG Gang^{1,2}, DENG Xu^{1,2}, LIU Chang^{1,2}, LIU Qing-chen^{1,2}

(1. Key Laboratory of Coast Civil Structure Safety (Tianjin University), Ministry of Education, Tianjin 300072, China; 2. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: The horizontal displacements of the retaining piles are monitored through the whole process of a deep excavation project. It is found that, due to the differences of horizontal bracing stiffness, the deformation modes of the retaining piles at different locations are different, and the maximum horizontal displacements also have significant differences. Through FEM modeling, the characteristics of the displacement fields caused by four deformation modes of retaining walls are analyzed. The results show that under the situations of different deformation modes of retaining structures with the same maximum horizontal displacement, the displacement fields of soils outside the excavation can be considerably different, and therefore the impacts on environment may vary greatly. In practical projects, besides controlling the maximum horizontal displacements of the retaining structures, the deformation mode of the retaining structures should be optimized according to the surrounding environment, and their kick-in deformation should be avoided.

Key words: retaining structure; deformation mode; displacement field; deformation characteristic; influence range

0 引言

基坑围护结构在基坑内外水、土侧压力差的作用下发生向坑内方向的移动, 加之基坑底面以下土体的隆起变形, 可引起坑外土体位移, 从而对周边环境产生影响。随着城市密集化程度的增加, 基坑工程的周边环境也愈加复杂。除地表存在建筑物外, 浅层土体

中还会存在建筑物浅基础、市政管线, 深层土体中则可存在地铁车站、隧道以及贯穿于浅层深层土体的桩基础等各类结构物(见图1)。因此, 精细化研究基坑

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973计划)资助项目(2010CB732106); 天津市科技计划项目(11ZCGYSF00800)
收稿日期: 2013-06-14

开挖引起的基坑周边土体的位移变化规律,对于分析基坑开挖对复杂环境的影响是非常必要的。

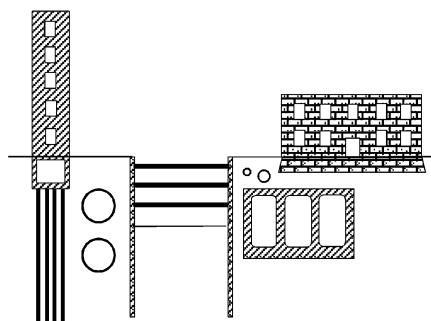


图 1 基坑周边环境示意图

Fig. 1 Surroundings around excavation

然而,关于基坑开挖引起的变形问题,目前的研究重点仍主要集中在地表沉降方面,并提出了大量沉降预测曲线^[1-4]、经验公式^[5-6]以及地层损失法等简化计算方法^[7]用以估算地表沉降量值以及沉降影响范围,进而对邻近既有建筑物的安全性进行初步评估。但是对坑外深层土体变形的研究相对较少,较代表性的研究有,Capse^[8]采用对数螺旋线将墙后土体分成3个影响区,用以简单区分不同位置土体的扰动程度;李佳川等^[9]和Aye等^[10]均假定墙后深层土体沉降分布曲线与地表相似,通过设置沉降传递系数或者利用沉降槽与围护结构侧移之间体积的比例关系,确定不同深度处土体的沉降曲线;Ou等^[11]和Schuster等^[12]则根据实测数据和有限元分析研究了坑外不同位置土体竖向和水平方向的位移变化特点,认为不同距离和深度下土体的位移曲线分情况也并不相同。

由此可以发现,随着距离和埋置深度的不同,基坑开挖引起的坑外土体变形特点和扰动程度也不相同。

已有研究表明,受水平支撑沿深度的布置间距、水平支撑不同位置提供围护结构的支撑刚度以及施工方法等因素的影响,围护结构可以表现为多种变形模式,因而相应的墙后地表曲线也会呈现三角形和凹槽形的不同分布形式^[7]。龚晓南等^[13]将围护结构变形总结为悬臂、踢脚、内凸和复合4种模式。

对柔性围护结构,当不设置支撑或者开挖较浅、还未设置支撑时,表现为顶部位移最大的悬臂式分布;若开挖初期顶部即设置支撑,则表现为墙顶位移不变或向坑外移动,墙体中部向基坑内突出的内凸式模式;悬臂式与内凸式的组合即为复合式变形;而对于墙底位于软土中的围护结构,若插入深度较浅,墙底则会产生较大的位移,表现为踢脚变形模式^[7]。4种变形模式示意如图2所示。

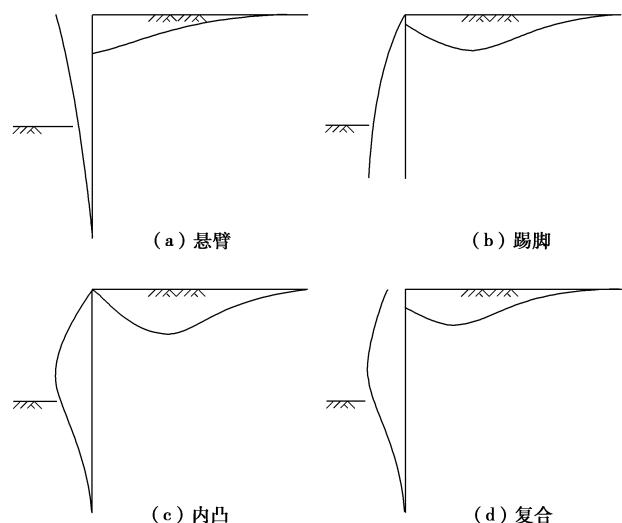


图 2 围护结构典型变形模式^[13]

Fig. 2 Typical profiles of wall deflection^[13]

关于基坑工程中围护结构的变形控制,目前中国现有的基坑方面的规范^[14-16]均主要针对围护结构的最大变形值进行控制。然而,郑刚等已进行的研究表明^[17],在基坑其它条件相同时,即使围护结构产生的最大水平位移相同,对应于围护结构的不同变形模式,基坑外建筑物产生的最大拉应变也会存在较大的不同。因此,分析基坑开挖对图1所示的基坑外不同距离、不同深度处的建(构)筑物、地下管线等结构的影响,仅仅研究地表沉降的分布规律、控制围护结构的最大位移,而不考虑围护结构不同变形模式的影响显然是不够的。

本文首先针对实际工程围护桩的不同变形模式开展了实测,进而采用考虑土体小应变特性的有限元模型,对围护结构不同变形模式下基坑开挖引发的坑外深层土体变形进行精细化分析,比较各种围护结构变形模式下坑外土体的变形状况和扰动范围,研究不同模式对于坑外土体变形的影响规律,为精细化地分析基坑开挖对环境的影响提供更好的依据。

1 工程实测研究

1.1 工程概况

仁恒海河广场III期项目位于天津市南开区东马路东侧,水阁大街以南,南侧与II期项目毗邻,东侧15 m外为需要重点保护的宗教建筑仁慈堂。III期项目为整体地下四层,整个地块呈L型。基坑开挖深度约为21 m,局部电梯井和集水坑处的开挖深度达到24 m,基坑周边长度520 m,开挖面积约为13000 m²。

基坑位于天津典型软弱土层中,地质条件复杂,开挖面积大、深度深,且紧邻道路和重点保护建筑,

需严格控制基坑支护变形对周边环境产生的影响。通过对比论证, 基坑工程中最终确定采用钻孔灌注桩作为挡土结构, 配合水泥搅拌桩及 TRD 工法作为止水措施, 同时在东侧坑外布设 6 排水泥搅拌桩加固和 1 排混凝土灌注桩作为隔离桩, 以减小支护结构施作及基坑施工对仁慈堂产生的扰动。根据本工程规模及场地条件特点, 内设四道水平支撑体系, 采用圆环组合形式, 以充分发挥混凝土的抗压特性, 减少支撑体系施工量, 方便土方开挖。基坑平面和剖面设计如图 3 所示。

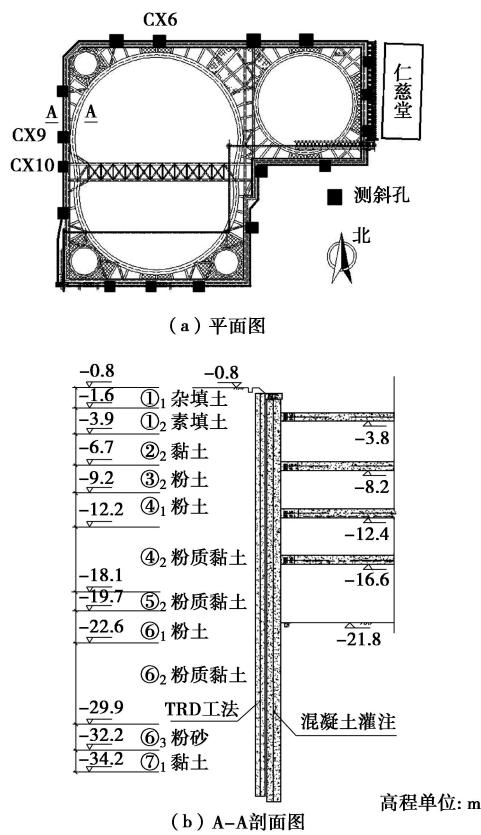


图 3 基坑平面和剖面图

Fig. 3 Plan and sectional view of excavation

1.2 监测结果分析

在实际施工中, 为准确掌握混凝土灌注桩变形, 判断基坑以及周围环境的安全状态, 在四周围护结构中共布设 17 个测斜孔, 如图 3 (a) 所示。其中 CX6 监测孔位于大圆环北侧边桁架最短处, CX10 孔紧邻对撑, CX9 孔位于与对撑相邻的边桁架最短位置处。基坑沿深度共分为 5 层进行土方开挖, 第一层为挖除第一道水平支撑底标高以上的土方。分别将桩身在不同工况下水平位移沿深度的分布曲线绘制于图 4 中, 可以发现:

(1) 基坑开挖初期, 桩身均产生顶部位移最大, 随深度增加位移逐渐减小的悬臂式变形模式, 但侧移

量值相对较小。

(2) 随着开挖深度的增加, 桩身的最大水平位移值逐渐增大, 并且最大水平位移点的位置也逐渐向下部转移。对于 CX6 孔, 由于所处位置的环形水平支撑体系刚度较弱, 不能发挥很好的支挡作用, 导致桩顶在基坑开挖过程中也产生较大的位移。开挖至坑底后, 桩身最大侧移约为 60 mm, 桩顶也产生 40 mm 的移动, 最大水平位移发生于第三道与第四道水平支撑之间。

(3) CX10 监测孔紧邻对撑, 支撑刚度较大, 除最大侧移量比 CX6 明显减小外, 桩身的变形模式也有所差别。桩顶最初产生一定的侧移, 但侧移不大, 最大值仅为 11 mm, 当开挖深度较大时, 最大位移逐渐转移至桩身下部, 受桩体刚度以及支撑体系的影响, 桩顶产生向坑外方向的移动, 开挖至坑底时, 桩顶侧移减小为 0, 桩身最大水平位移接近 35 mm, 最大水平位移发生于第四道水平支撑与坑底之间。

(4) CX9 监测孔同样位于边桁架最短位置, 但由于受到相邻对撑的影响, 水平支撑刚度明显大于 CX6, 挖深较大时桩顶向坑外方向移动, 桩身变形模式与 CX10 相似, 但桩顶存在一定的位移。从图 4 (d) 各桩身在开挖至坑底后的侧移曲线对比也可以看出, 虽然在同一圆环支撑体系之内, 但由于所处位置不同, 支撑体系提供的水平支撑刚度也并不相同。导致开挖至坑底后, CX6、CX9 和 CX10 位置桩身的变形分布形式相差很大, CX6 处桩身的水平位移最大, 随着不同位置支撑刚度的增加桩身侧移逐渐减小, 并且最大位移发生位置也向下转移。

(5) 在基坑开挖过程中, 围护结构变形模式不仅会随着挖深的增加而逐渐改变; 而且由于支撑体系刚度在基坑中分布不均匀, 在挖深相同情况下, 不同位置处围护结构的变形模式也可能存在差别。从图 4 中看出, CX6 测点的土体水平位移在第二层、第三层土方开挖完成时, 围护桩水平位移表现出上大、下小的变形形式, 与悬臂式的变形相似, 第四层土方、第五层土方(即由第三道水平支撑底部至坑底)开挖完成时, 围护桩的侧移形式发生变化, 变为复合型的侧移模式(见图 4 (a))。而 CX10 测点的水平位移模式也由初始的悬臂型变为典型的内凸型见图 4 (c)。显然, 不同变形模式将会引起围护结构内力分布的变化, 同时也将对基坑内外的土体位移场产生不同的影响。

在不同的围护结构变形模式下, 除已有研究已指出地表沉降分布不同外, 坑外深层土体的变形特性也可能存在明显的差别。研究各种模式下墙后深层土体的变形曲线分布特点, 对比不同模式在同一深度处的

扰动程度,以便针对周边具体环境,选择恰当的设计施工方法使得围护结构产生合理、有利的变形模式,从而减小对相应位置土体的扰动,达到控制结构变形在规定范围之内目的,这对于实际工程中保护周边环境维护结构安全很有必要。

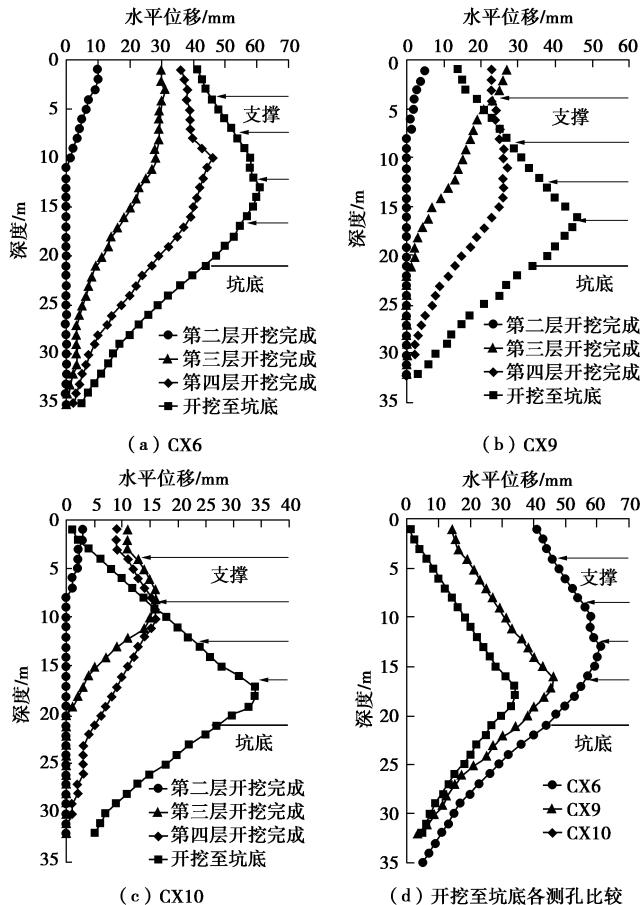


图 4 桩身水平位移 - 深度关系曲线

Fig. 4 Relationship between horizontal displacement and depth

2 数值分析模型及结果验证

2.1 计算模型及参数介绍

本文采用 Plaxis 有限元软件进行建模计算。模型中取基坑的开挖深度为 18 m, 开挖宽度为 60 m。为减少模型计算量, 节约计算成本, 考虑对称性取 1/2 基坑尺寸进行建模, 即模型中坑内宽度取为 30 m。同时, 模型坑外范围取为 120 m, 约为 6.7 倍开挖深度, 而坑底以下取 3 倍挖深, 即 54 m, 基本能满足模型边界条件对基坑变形无影响的要求。

根据已有研究, 可将围护结构变形模式归纳为内凸型、悬臂型、复合型以及踢脚型 4 类。本文将首先对内凸型变形模式进行详细介绍, 模型尺寸如图 5 所示, 其余 3 种变形模式将在内凸型模型基础上通过调整围护结构刚度、支撑位置、支撑刚度来控制。此外, 为满足踢脚型变形模式, 在基坑内坑底以下还设置一

层软弱土层以保证围护结构墙底向坑内产生的水平位移最大。

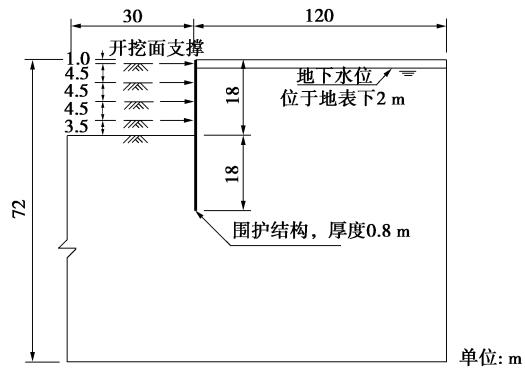


图 5 模型尺寸示意图

Fig. 5 Dimensions of model

徐中华等^[18]指出在敏感性条件下, 反映土体小应变特性的高级本构模型更能够合理体现围护结构变形以及坑外土体位移。因此, 本文模型中的土体采用 Plaxis 有限元软件中的小应变硬化模型 (HSS) 进行模拟, 并选取天津市区土层中典型的粉质黏土层参数。为简化起见, 忽略土层的成层性影响, 采用单一土层进行计算分析。具体的土体物理力学参数: 土体的重度 $\gamma = 19.78 \text{ kN/m}^3$, 土体的有效黏聚力 $c' = 13.95 \text{ kN/m}^2$, 土体的有效内摩擦角 $\varphi' = 25.66^\circ$, 三轴试验参考围压下 50% 强度的割线模量 $E_{50}^{\text{ref}} = 7210 \text{ kN/m}^2$, 卸载/重加载参考模量 $E_{\text{ur}}^{\text{ref}} = 36770 \text{ kN/m}^2$, 固结仪实验在参考围压下的切线模量 $E_{\text{oed}}^{\text{ref}} = 5055 \text{ kN/m}^2$ 。此外模型中还增加两个指标用以反映土体小应变特性: 初始阶段小应变的参考剪切刚度 $G_0^{\text{ref}} = 147100 \text{ kN/m}^2$ 和剪切应变水平参数 $\gamma_{0.7} = 0.2 \times 10^{-3}$, 其中 $\gamma_{0.7}$ 表示初始剪切刚度 G_0 减小到 70% 时的应变水平。为保证上述模型参数的准确性, 通过室内常规三轴试验和固结试验, 并结合工程经验^[19]确定以上指标。

模型基本分析过程如下:

- (1) 生成初始地应力场。
 - (2) 将初始位移清零, 激活围护结构的板单元, 模拟支护结构施工。
 - (3) 开挖至地表以下 1 m。
 - (4) 坑内降水至地表下 5.5 m 处开挖面, 并施工相应位置支撑。
 - (5) 开挖至地表下 5.5 m 处开挖面。
 - (6) 重复步骤 (4) 和 (5) 直至开挖至地表以下 18 m 处的基坑坑底。
- ### 2.2 计算结果验证
- Hsieh 等^[3]结合实际工程案例提出了预测地表沉降的两种经验曲线——三角形沉降曲线和凹槽形沉降曲线, 对凹槽形曲线, 认为预测曲线分布如图 6 (a)

中的虚线所示。Schuster 等^[12]通过对工程实测数据和数值模拟分析, 指出坑外地表土体的水平位移与 Hsieh 等提出的地表沉降模式相似, 曲线变形趋势如图 6(b) 图中虚线所示。

本文模型计算所得坑外地表沉降和水平位移曲线分别如图 6(a) 和 6(b) 中实线所示, 通过比较可以认为模型计算结果无论是在地表沉降还是水平位移方面都与学者的研究结论基本一致, 证明考虑土体小应变特性的本构模型可以很好的反映坑外地表土体的变形情况。同时也说明本文模型中所采用的土体参数合理可靠, 能够得到比较满意的计算结果, 可以在此基础上进一步研究基坑开挖引起的围护结构不同水平位移模式对于深层土体位移场的影响。

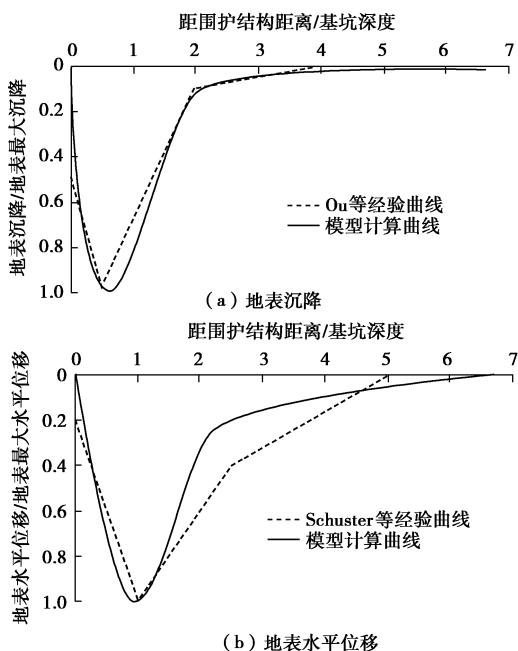


图 6 坑外地表变形曲线对比图

Fig. 6 Comparison of curves of ground surface deformation

3 围护结构内凸型模式下坑外地表变形特性

首先以内凸型变形模式为例, 分析其引起的坑外地表土体的变形规律, 然后再与其它围护结构变形模式引起的坑外地表位移进行对比分析。

3.1 坑外地表变形

根据前文所述模型尺寸和参数, 当围护结构产生内凸型变形模式, 最大水平位移达到 45 mm 情况下, 坑外地表沉降以及水平位移的变形曲线分布如图 7 所示。

由于围护结构顶部位移几乎为零, 使得坑外紧邻墙体处地表基本不发生沉降, 曲线分布呈凹槽形, 最大沉降值约为 30 mm, 发生在距围护结构 0.5 倍开挖

深度处, 并且沉降槽主要影响范围集中在 2 倍开挖深度以内。

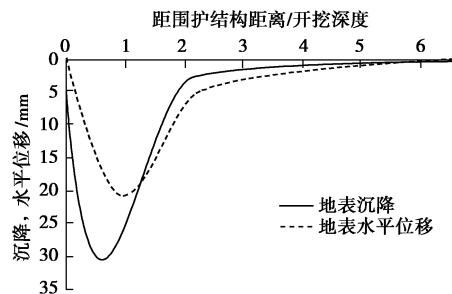


图 7 坑外地表变形图

Fig. 7 Curves of ground surface deformation

地表水平位移分布形式与沉降类似, 亦呈凹槽形分布, 但是位移最大值相比于沉降略小, 约为 0.7 倍最大沉降值, 即 21 mm, 出现在坑外约 1 倍挖深处, 距围护结构的距离比沉降最大值发生位置距围护结构的距离更大。

在实际工程中人们往往更多的关注地表沉降对于坑外环境的影响, 但从计算结果来看, 坑外地表土体水平位移的影响范围比沉降更大, 因此在施工过程中同样需要引起注意。

3.2 坑外深层土体沉降

图 8(a) 为基坑开挖完成后, 围护结构的变形曲线, 图 8(b) 则为相应的坑外深层土体在不同深度处的竖向变形分布曲线。其中横坐标为距围护结构距离与基坑深度的比值, 纵坐标为土层深度。为表述方便, 定义土体发生沉降为正, 隆起为负, 并在位移关键位置(如紧邻围护结构、最大竖向位移点等)处标注出其相应变形值, 单位为 mm。

从图 8(b) 中可以看出, 基坑开挖引起的坑外深层土体竖向变形情况较为复杂。随着深度的增加土体位移的影响范围逐渐减小, 在主要影响区之内, 根据其变形特点可以将坑外土体分为不同的区域:

(1) 凹槽形沉降区: 从地表至 24 m 深度范围内, 影响区内的沉降曲线均与地表相似, 呈凹槽形分布。但是沉降发生的最大位置并非在地表, 而是在地表以下 3~6 m 深度处, 这与 Ou 等通过台北企业中心基坑得到的实测现象相同^[11]。虽然在此区域之内沉降槽的影响范围随深度增加逐渐减小, 然而曲线的沉降最大值位置距围护结构距离却均保持在 0.5 倍挖深左右, 不随深度改变, 在实际工程中对于该位置处的结构应尤其引起注意。根据上述该区域的变形特点, 可以将此区域定义为凹槽形沉降区。

(2) 变形过渡区: 自地表下 24~33 m 范围内, 土体变形情况比较复杂, 该区域内土体最大沉降点由

距围护结构一定距离处向紧邻围护结构位置转移, 即变形曲线由凹槽形逐渐过渡为三角形分布。并且随着深度的增加, 由于受到基坑内土体卸荷作用的影响, 深层部分区域的土体会产生一定的隆起变形。此范围内土体逐渐由凹槽形沉降形式向隆起变形过渡, 故定义此区域为变形过渡区。

(3) 隆起区: 受坑内土体卸荷回弹的影响, 围护结构同样产生上浮变形, 从而带动墙底附近及墙底以下深度的土体产生隆起(除墙后小范围内由于墙身向坑内移动的影响而产生一定的沉降外), 故该区域内土体主要表现为隆起变形, 变形曲线形态呈现三角形分布, 紧邻基坑位置隆起量最大, 距基坑越远变形越小。定义该区域为隆起区。

根据上述分析, 围护结构呈内凸型变形时, 坑外深层土体可以将其按照变形特点进行分区, 分区的示意图如图8(c)所示。基坑周围环境中往往分布着不同类型的结构, 如地表的不同类型建筑物、浅层中的市政管线和建筑物浅基础, 以及深层的地铁车站和隧道等结构。对应于图8(c)的竖向变形分区可知, 坑外不同深度处土体的竖向变形趋势并不相同, 从而对结构的影响也有所差别, 在实际工程中应根据具体情况区别处理。

3.3 坑外深层土体水平位移

图9(b)为距围护结构不同距离处土体的水平位移曲线。定义水平位移向坑内方向移动为正, 向坑外

为负, 并在位移关键位置(如地表、最大水平位移点等)处标注出其相应变形值, 单位为mm。横纵坐标轴定义与图8相同。

水平位移的影响深度亦随距离的增加而逐渐减小, 在主要影响区之内, 不同区域土体变形具有如下的特点:

(1) 当距围护结构距离与开挖深度的比值小于0.5时, 水平位移曲线与墙体变形模式相似, 呈比较明显的弓形分布形式, 位移在中间表现为最大, 而上部下部的位移相对较小。该区域另一个显著特征是, 随着距离墙体的距离增加, 地表水平位移逐渐增大, 而土体深层的最大水平位移逐渐减小且深层最大水平位移产生的深度逐渐减小, 曲线趋于平滑, 但是曲线仍表现为比较明显的弓形变形形态。

(2) 随着继续远离围护结构, 地表水平位移接近甚至超过中部最大位移, 曲线呈“S”形分布, 并逐渐向悬臂形形态过渡。

(3) 当距围护结构距离与开挖深度的比值大于1.0后, 水平位移曲线完全为地表位移最大的悬臂式曲线分布, 并且随着距离的增加, 地表最大水平位移逐渐减小, 曲线趋于平缓, 表明基坑开挖对坑外深层土体水平位移的影响已经很小。

Ou等^[20]对台北企业中心深基坑进行了全程监测, 图10为地连墙以及坑外土体的水平位移分布曲线, 其中I-1曲线表示地连墙水平位移。由于开挖初期支撑

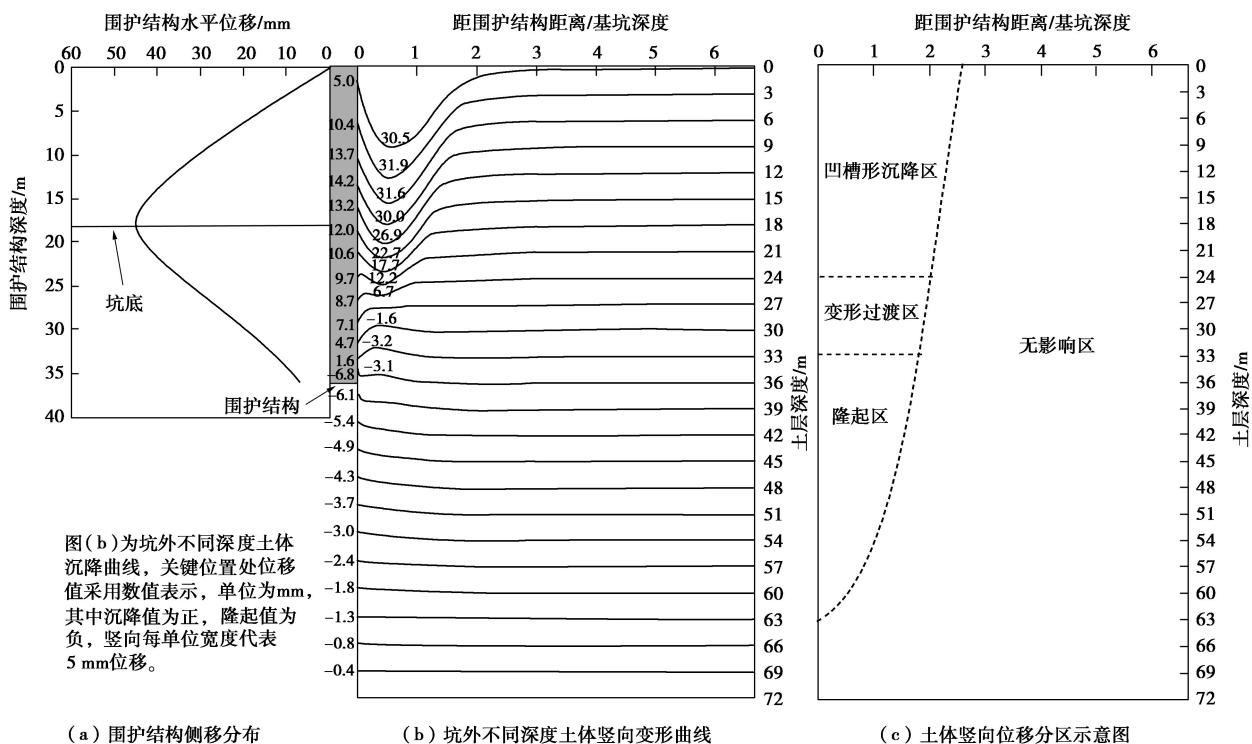


图8 开挖完成后坑外深层土体竖向变形及影响区划分示意图

Fig. 8 Settlement of deep soils and divisions of influence region after excavation finished

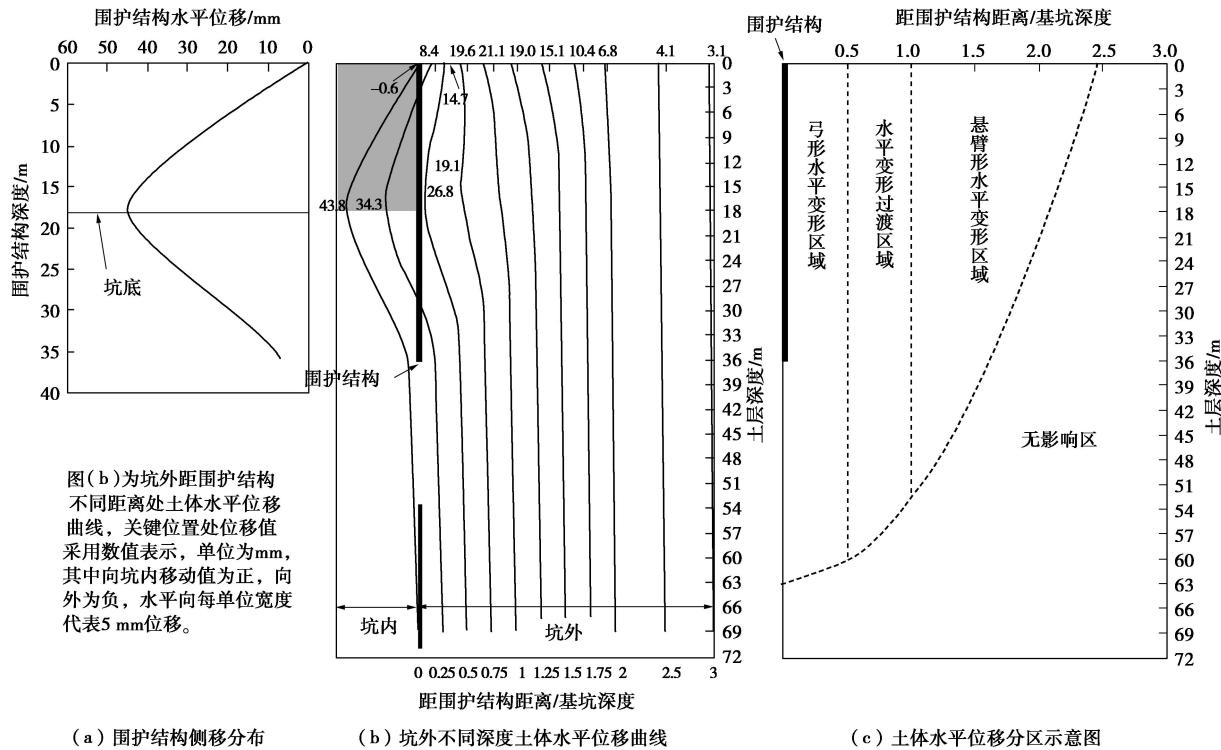


图 9 开挖完成后坑外深层土体水平位移及影响区划分示意图

Fig. 9 Horizontal displacements of deep soils and divisions of influence region after excavation finished

尚未架设, 导致最终地连墙墙顶产生一定位移, 符合围护结构复合型变形模式的特点。根据实测可知, 距地连墙较近处的坑外土体水平位移曲线与墙体变形相似, 呈弓形分布; 随着距离的增加, 坑外土体最大水平位移位置逐步向地表过渡; 当距离超过一定范围, 最大水平位移位于地表, 曲线呈悬臂形。由图 9 (b) 计算所得内凸型以及图 11 (b) 计算所得复合型变形模式下坑外土体水平位移场可知, 计算揭示的墙后不同距离土体水平位移分布规律与图 10 实测结果基本一致。

因此, 通过有限元计算和实测数据验证, 可以将内凸型和复合型变形模式下, 坑外深层土体的水平位移根据特性简单分为弓形水平变形区、水平变形过渡区和悬臂形水平变形区 3 个区域, 划分示意如图 9(c) 所示。从图 11 (b) 可进一步看出, 对围护结构发生复合型水平变形的数值分析, 其墙后土体的水平位移变化规律与图 10 实测结果也相当一致。

显然, 上述水平位移分区对于判断基坑开挖引起的坑外土体水平位移对坑外建筑物、立交桥等的桩基的影响是有显著针对性的。例如, 对紧邻基坑并处于弓形变形区的立交桥桩基础, 需要更关注桩身中部的弯曲变形, 桩顶位移引起的立交桥墩水平位移、倾斜均不显著; 对处于距离更大处、位于变形过渡区、悬臂形变形区的立交桥桩基础, 则对桩顶的水平位移影响更大, 相应可能造成立交桥的过大水平位移和桥墩

的倾斜。

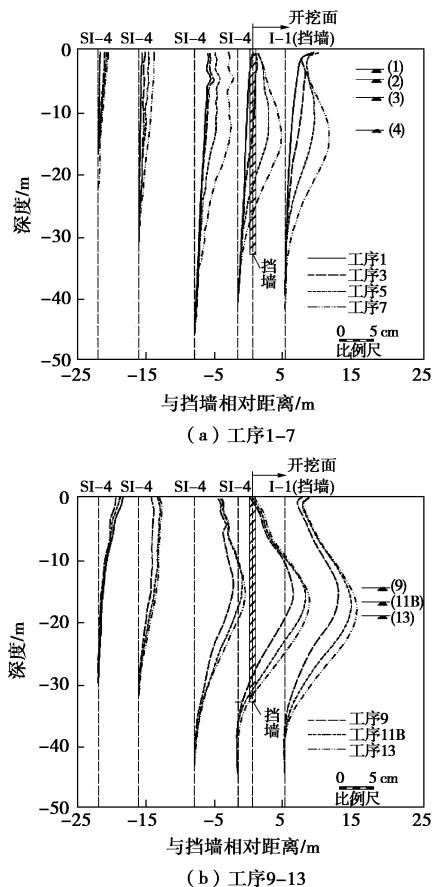
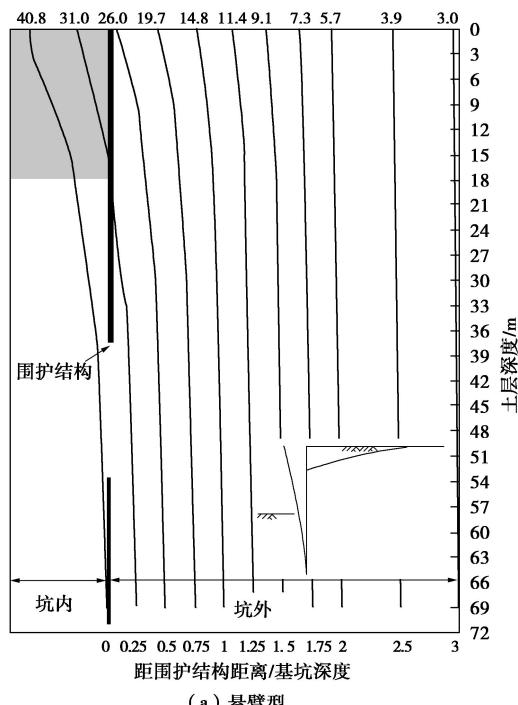
图 10 不同开挖阶段地连墙及坑外土体水平位移^[20]

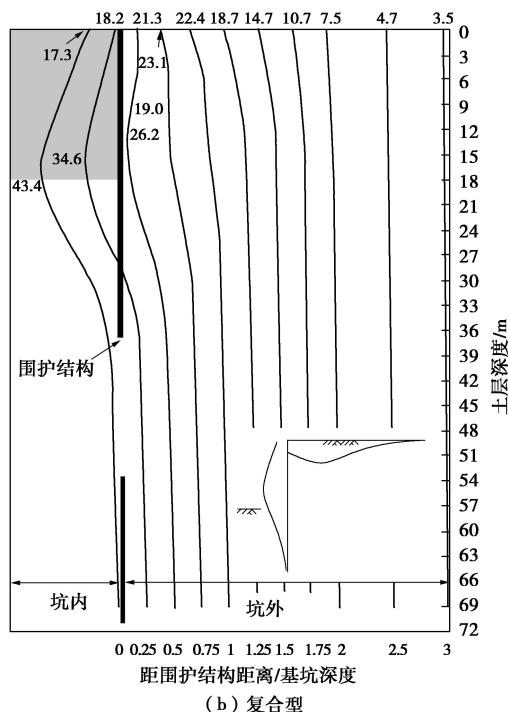
Fig. 10 Horizontal displacements of wall displacement and deep soil at different stages

4 围护结构不同变形模式下坑外土体变形特性对比

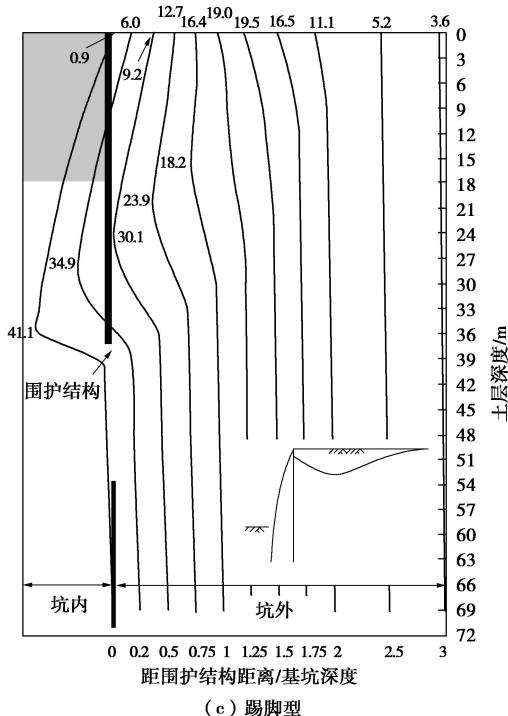
前文详细分析了围护结构内凸型变形模式下坑外深层土体的位移场的分布与分区特点。在实际工程中基坑围护结构的变形可表现为不同的分布模式，相应地，坑外深层土体变形也会有所差别。因此，下文将在前述内凸型变形模式基础上进一步探讨其他模式对坑外深层土体位移的影响，并将相应的变形特性进行对比分析，以深入了解不同围护结构变形模式下周围



(a) 悬臂型



(b) 复合型



(c) 踢脚型

图 11 3 种模式下坑外深层土体水平位移

Fig. 11 Horizontal displacements of deep soils under three modes of retaining structures

环境的变形状况。

在内凸型模型的基础之上，通过调整水平支撑刚度、水平支撑标高和围护结构刚度，在保证围护结构最大位移保持 45 mm 不变的前提下，得到 4 种典型围护结构变形模式如图 12 (a) 所示。

4.1 坑外地表竖向变形对比

4 种围护结构变形模式下各自坑外地表土体沉降曲线分布如图 12 (b) 所示。与内凸型情况下的曲线对比，其余 3 种模式的地表沉降曲线各自存在以下特点：

(1) 悬臂型：地表沉降曲线的最大沉降点发生在几乎紧邻围护结构位置处，并随距离增大沉降值迅速减小，曲线表现为三角形分布形式，并且沉降影响范围明显小于内凸型。

(2) 复合型：当围护结构变形表现为复合型模式时，与内凸型相似，沉降曲线表现为凹槽分布形式。但是由于允许墙顶产生一定的位移，对土体的约束减弱，导致紧邻围护结构位置产生一定的沉降。约 1 倍坑深以外，复合型与内凸型曲线分布基本一致，两种模式对坑外沉降的影响范围相同。

(3) 踢脚型坑外地表同样产生凹槽形沉降分布形式，但与内凸型相比，沉降最大值略小但距围护结构距离更远，并且沉降影响范围更大。

(4) 围护结构产生不同变形模式导致坑外沉降

曲线分布也不相同, 除悬臂型坑外表现为三角形沉降外, 其余曲线均为凹槽形沉降; 而沉降影响范围为悬臂型最小, 内凸型和复合型居中, 踢脚型影响范围最大。

4.2 坑外地表水平位移对比

不同围护结构变形模式引起的各自坑外地表土体水平位移曲线同样也不相同, 如图 12(c) 所示。通过与内凸情况下的曲线对比, 其余 3 种模式的地表水平位移曲线各自的特点如下:

(1) 悬臂型: 坑外地表水平位移分布同样表现为三角形分布形式, 由于围护结构顶部位移最大, 导致地表最大水平位移明显大于内凸型, 对于坑外存在地表建筑物及浅层结构情况应当尽量避免此种变形的发生。但位移影响范围却比内凸型模式更小。

(2) 复合型: 坑外地表水平位移分布曲线呈凹槽形分布, 由于允许墙顶移动, 导致紧邻围护结构处地表亦产生一定的位移, 但距围护结构 1 倍坑深以外两曲线基本重合。

(3) 踢脚型: 地表水平位移分布曲线亦表现为凹槽形分布, 但发生位置转移至 1.5 倍坑深处, 影响范围明显大于内凸型。

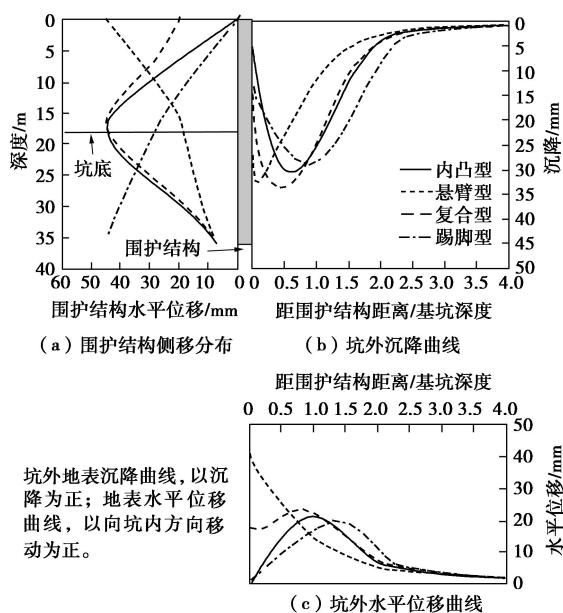


图 12 不同围护结构变形模式下坑外地表变形对比

Fig. 12 Comparison of ground surface deformation curves under different deformation modes of retaining structures

(4) 不同围护结构变形模式引起的坑外地表水平位移变形也各有特点, 悬臂型模式下水平位移曲线由于受到墙体变形的影响呈三角形分布, 并且最大值远大于其余模式下的凹槽形分布情况; 但对于水平位移影响范围而言, 同样为悬臂型最小, 内凸型和复合型居中, 踢脚型影响范围最大。

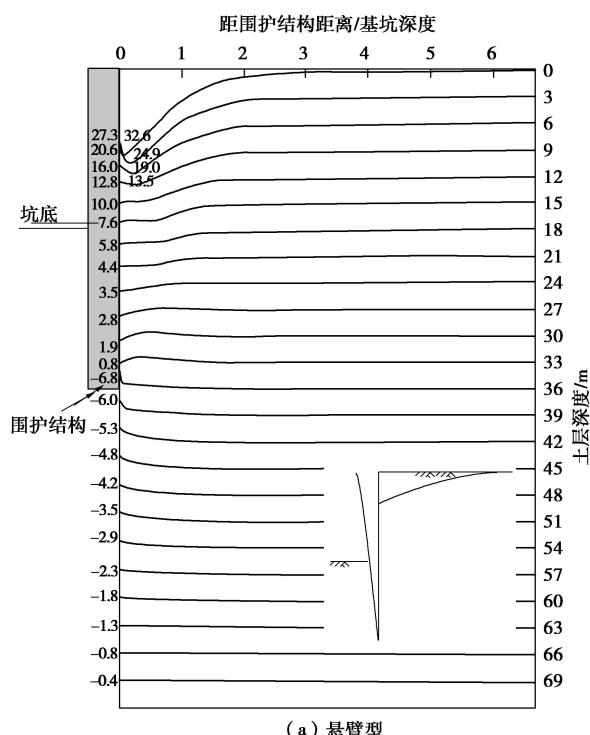
4.3 坑外深层沉降对比

在围护结构最大水平位移相同情况下, 4 种变形模式引起的坑外深层土体竖向变形曲线也各有特点, 其中内凸型模式下的分布特点前文已述, 另外 3 种模式下曲线分布如图 13 所示, 具体特点为:

(1) 悬臂型: 如图 13(a) 所示, 墙底以上区域土体基本表现为三角形沉降分布曲线, 随深度增加曲线趋于平缓, 且深层土体由于受到坑内卸荷回弹的影响, 部分区域产生一定的隆起; 而围护结构墙底以下, 土体全部产生隆起变形, 且曲线呈三角形分布。综上所述, 在基坑开挖的主要影响范围内, 可以将悬臂型模式下坑外土体分为两个区域, 分别为三角形沉降区和隆起区, 其中隆起可发生于坑外墙底以上一定高度处。

(2) 复合型: 如图 13(b) 所示, 在主要影响区范围内, 其坑外土体竖向变形分布特性与内凸型非常相似, 包括上部区域的凹槽形沉降区、下部深层土体的三角形过渡区以及墙底以下的隆起区, 其中隆起可发生于坑外墙底以上一定高度处。但是对于凹槽形沉降区, 由于围护结构复合型变形允许墙顶产生一定位移, 对紧邻墙体位置的土体约束减弱, 与内凸型变形相比, 墙体附近浅层土体的沉降值明显增大。

(3) 踢脚型: 由于墙体最大位移发生在底部, 因此对坑外深层土体竖向变形分布产生很大的影响。从图 13(c) 可以看出, 与内凸型模式相比, 踢脚型坑外深层土体中凹槽形沉降区的深度明显增加, 并且



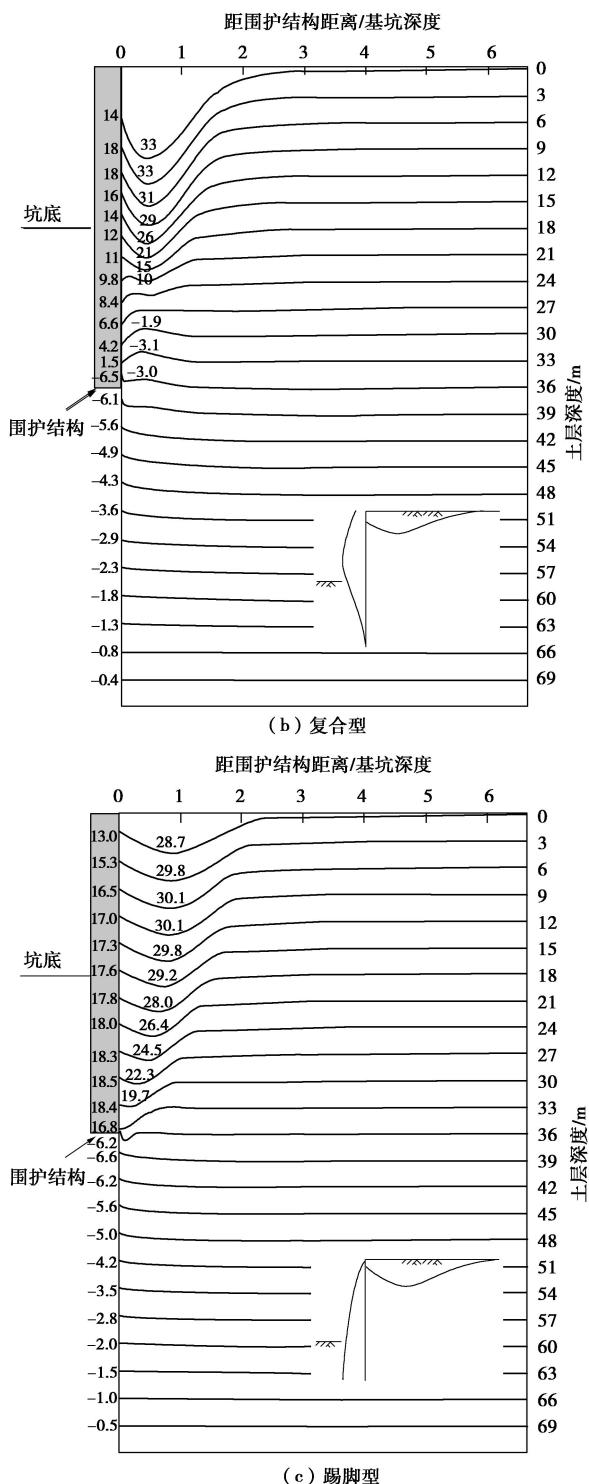


图 13 3 种模式下坑外深层土体竖向变形

Fig. 13 Settlements of deep soils under three deformation modes
of retaining structures

沉降槽的宽度比内凸型更大。即踢脚型模式下沉降槽更平缓但是影响范围深度更深且水平距离更远。同时，三角形过渡区的范围明显减小，局部隆起现象也不明显。根据上述分析，同样可以将踢脚型影响区内分为凹槽形沉降区、三角形过渡区和墙底以下的隆起区 3 个区域，但是凹槽形沉降区的影响宽度和深度均较大，而三角形过渡区相对则范围很小，甚至可以忽略。

为了更直观比较不同围护结构变形模式下坑外深层土体竖向变形曲线的差异，以 9 m 为间隔将 4 种模式下的曲线分布绘制在同一图中，如图 14 所示。墙底以下土体在不同围护结构变形模式下的竖向变形曲

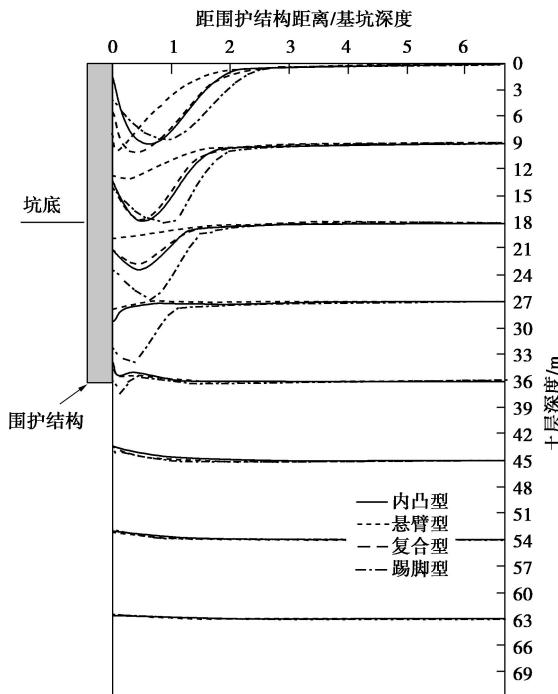


图 14 不同变形模式下坑外深层土体竖向变形曲线对比

Fig. 14 Comparison of curves of settlements of deep soils under different deformation modes of retaining structures

线基本重合，变形差异主要体现在墙底以上的土体区域内。地表以下随着深度的增加，悬臂型模式下的土体竖向变形曲线迅速收敛，复合型与内凸型曲线分布趋于一致并且也逐渐平缓，而踢脚型模式下的曲线相对影响范围更深，至地表以下 27 m 深度，内凸、悬臂和复合模式曲线变形已经很小，但踢脚模式下曲线仍有较大的沉降。而通过对比可知，坑外土体尤其是对浅部土层，围护结构呈悬臂型变形的影响范围最小，内凸型和复合型影响曲线基本重合，曲线分布大于悬臂型，而踢脚型的影响范围尤其是对于浅部土层在 4 种模式中是最大的。因此，在实际工程中，要尽量避免出现围护结构踢脚式的变形，防止基坑开挖对周边环境产生过大范围的影响。

4.4 坑外深层水平位移对比

坑外深层土体水平位移曲线也与围护结构变形模式密切相关，前文已分析了内凸型模式下的分布特点，当保持围护结构最大水平位移相同情况下，其余 3 种模式下曲线分布如图 11 所示，具体特点如下所述：

(1) 悬臂型：其坑外土体水平位移分布曲线与墙体变形模式趋势一致，基本呈地表水平位移最大、随深度增加水平位移逐渐减小的悬臂变形形式，并且

随着距离的增加位移曲线逐渐平缓, 因此悬臂型模式下坑外水平位移基本都为悬臂形变形区。

(2) 复合型: 其坑外土体水平位移分布曲线形式与内凸型基本相同, 可以分为弓形水平变形区、水平变形过渡区以及悬臂形水平变形区。但由于复合型变形允许墙顶发生一定的位移, 因此导致复合模式下距围护结构较近范围内坑外地表水平位移大于内凸型, 弓形水平变形区域相对略小。

(3) 踢脚型: 受墙体变形的影响, 紧邻墙身处的土体也呈现踢脚形变形, 墙底部附近土体水平位移最大, 而其下水平位移迅速减小, 故紧邻基坑位置土体水平位移仍表现为弓形, 但最大变形位置出现在墙底附近。并且相应弓形水平变形区、水平变形过渡区和悬臂型水平变形区的范围较内凸型模式均向远处扩展, 水平位移的影响范围更大。

与前文竖向变形对比类似, 同样以 9 m 为间隔将 4 种模式下的水平位移曲线分布绘制在同一图中, 如图 15 所示。水平位移的差异也主要体现在墙底以上的土体区域内。悬臂型模式下的水平位移在地表最大, 随着深度的增加曲线迅速收敛; 复合型与内凸型曲线分布趋于一致, 在坑底位置达到最大, 其下也逐渐平缓; 而踢脚型模式由于围护结构最大位移在墙底部, 导致坑外土体水平位移曲线沿深度也持续增长至墙底部达到最大。

不同模式下坑外深层土体竖向变形分布曲线均随着深度的增加而逐渐趋于平缓, 但是水平位移曲线由于受到围护结构最大位移位置的影响, 与竖向变形曲线的规律明显不同。表现为围护结构变位最大位置引起墙后附近土体水平位移的变形也更加剧烈, 因此针对基坑周边环境具体条件, 除应控制围护结构最大水平位移外, 还应控制围护结构的水平位移形式, 避免产生最不利的水平位移模式。例如, 对于坑外浅层存在浅基础和市政管线, 应避免出现围护结构顶部产生较大变形的悬臂型围护结构水平变形模式; 而坑底附近邻近既有隧道等结构时, 则要尽量减小坑底处的围护结构水平位移; 此外还应尽量避免产生踢脚型的围护结构水平变形模式。

进一步地从图 9~11 中距围护结构不同距离的土体水平位移分布规律可看出, 当基坑外有建筑物、立交桥桩基时, 不同的围护结构变形模式对桩的影响会产生差别, 同时, 即使对同一种围护结构变形模式, 对围护结构外不同距离处桩基的变形与内力影响也是不同的。例如, 在图 9(b) 中, 围护结构顶部水平位移很小, 当桩邻近围护结构时, 桩主要产生挠曲, 桩顶的水平位移很小, 因此, 主要考虑桩身产生的附

加弯矩, 而当桩距围护结构距离超过 0.75 倍开挖深度时, 桩身主要表现为倾覆型位移, 因此, 除应考虑桩身弯矩以外, 桩顶的水平位移、桩身倾斜均可引起其上结构产生较大倾斜和水平位移, 也是需要考虑的。

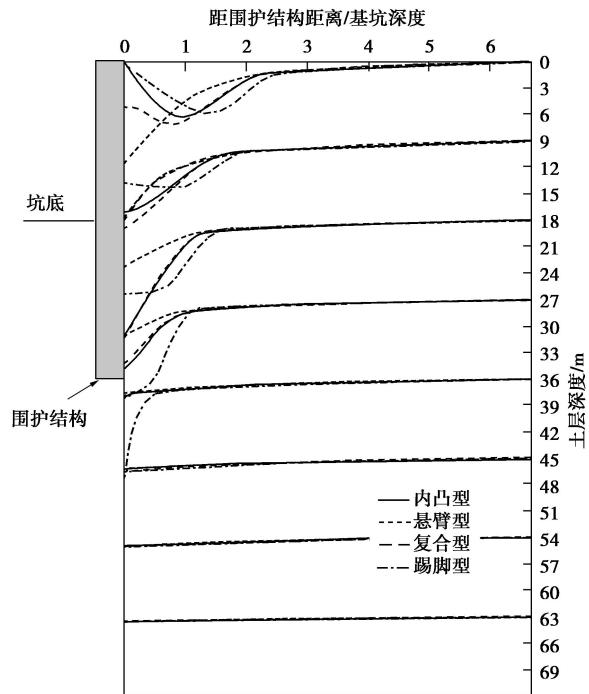


图 15 不同变形模式下坑外深层土体水平位移曲线对比

Fig. 15 Comparison of curves of horizontal displacements of deep soils under different deformation modes of retaining structures

5 结 论

本文首先针对工程案例分析了基坑不同位置处围护结构的变形特性, 进而采用考虑土体小应变特性的有限元模型, 详细分析了围护结构内凸型变形模式下基坑开挖对于坑外土体位移场的影响, 进而在此基础上探讨了在保持围护结构最大水平位移相同的情况下, 悬臂型、复合型和踢脚型模式引起的坑外土体各自的变形特点, 并将 4 种模式下的变形特性进行对比, 得到如下结论:

(1) 在基坑开挖过程中, 围护结构变形模式不仅会随着挖深的增加而逐渐改变; 而且由于支撑体系刚度在基坑中分布不均匀, 在挖深相同情况下, 不同位置处围护结构的变形模式也可能存在差别。

(2) 根据竖向变形分布特点, 可将内凸型模式下坑外深层土体分为凹槽形沉降区、三角形过渡区和隆起区; 复合型模式分区与内凸型基本相似, 仅在墙后浅层土体沉降相对较大; 悬臂型模式下坑外土体主要分为三角形变形区和隆起区; 踢脚型模式导致坑外

土体凹槽形沉降区的影响宽度和深度均较大, 而三角形过渡区相对则范围很小, 甚至可以忽略。坑外土体竖向位移, 尤其是对浅部土层, 围护结构呈悬臂型变形的影响范围最小, 内凸型和复合型影响范围曲线居中, 而踢脚型的影响范围尤其是对于浅部土层在 4 种模式中是最大的。

(3) 当围护结构表现为内凸式或者复合式变形时, 坑外深层土体的水平位移场根据变形特点可以分为弓形水平变形区、水平变形过渡区以及悬臂形水平变形区, 其中复合型模式受墙顶位移影响弓形区域范围略小; 悬臂型模式坑外土体水平位移场也呈悬臂形; 踢脚型模式的弓形区域最大变形位置出现在墙底附近。就影响范围而言, 同样为悬臂型模式最小, 内凸型和复合型居中, 踢脚型的影响范围最大。

(4) 围护结构变形模式不同将导致坑外位移场分布及影响范围均发生显著变化。基坑周围环境复杂多变, 在支护结构设计时应充分考虑坑外既有建(构)筑物的类型、基础型式、相对于基坑围护结构的位置, 控制合理的围护结构变形模式, 从而减小对结构扰动、保护结构安全。同时, 在设计施工过程中应保证围护结构刚度及入土深度, 并尽量减小最后一道水平支撑与开挖面之间的距离, 以避免产生踢脚模式的围护结构变形形态, 防止对周围环境产生不利影响。

当然, 本文针对不同围护结构变形模式下坑外土体位移场的分布特点还与基坑开挖深度、宽度以及土质条件等因素有关, 今后应继续进行深入研究。此外, 建(构)筑物存在也会改变土体刚度, 进而影响位移场分布特点, 因此对于基坑开挖对既有结构影响, 也应结合具体情况单独分析, 判断对结构的扰动程度, 进而有针对性的进行保护。

参考文献:

- [1] PECK R B. Deep excavation and tunneling in soft ground[C]// Proceedings of the 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, State-of-the-Art volume. Mexico City, 1969: 225 – 290.
- [2] CLOUGH G W, O'ROURKE T D. Construction induced movements of insitu walls[C]// Proceedings ASCE Conference on Soil and Mechanics and Performance of Earth Retaining Structures. New York: ASCE, Special Conference, 1990: 439 – 470.
- [3] HSIEH P G, OU C Y. Shape of ground surface settlement profiles caused by excavation[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1998, 35: 1004 – 1017.
- [4] 王卫东, 徐中华, 王建华. 上海地区深基坑周边地表变形性状实测统计分析[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(11): 1659 – 1666. (WANG Wei-dong, XU Zhong-hua, WANG Jian-hua. Statistical analysis of characteristics of ground surface settlement caused by deep excavations in Shanghai soft soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(11):1659 – 1666. (in Chinese))
- [5] DBJ08—61—97 上海市标准基坑工程设计规程[S]. 1997. (DBJ08—61—97 Shanghai standard code for design of excavation engineering[S]. 1997. (in Chinese))
- [6] 丁勇春. 软土地区深基坑施工引起的变形及控制研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2009. (DING Yong-chun. Excavation-induced deformation and control in soft deposits[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2009. (in Chinese))
- [7] 刘国彬, 王卫东. 基坑工程手册[M]. 2 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009. (LIU Guo-bin, WANG Wei-dong. Excavation engineering manual[M]. 2nd ed. Beijing: China Architecture and Building Press, 2009. (in Chinese))
- [8] CASPE M S. Surface settlement adjacent to braced open cuts[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 1966, 92(SM4): 51 – 59.
- [9] 李佳川, 夏明耀. 地下连续墙深基坑开挖与纵向地下管线保护[J]. 同济大学学报, 1995, 23(5): 499 – 504. (LI Jia-chuan, XIA Ming-yao. Protection of longitudinal underground pipe lines during the diaphragm wall deep excavation[J]. Journal of Tongji University, 1995, 23(5): 499 – 504. (in Chinese))
- [10] AYE Z Z, KARKI D, SCHULZ C. Ground movement prediction and building damage risk-assessment for the deep excavations and tunneling works in Bangkok subsoil[C]// International Symposium on Underground Excavation and Tunnelling. Bangkok, 2006: 281 – 297.
- [11] OU C Y, LIAO J T, CHENG W L. Building response and ground movements induced by a deep excavation[J]. Géotechnique, 2000, 50(3): 209 – 220.
- [12] SCHUSTER M, KUNG G T C, JUANG C H, et al. Simplified model for evaluating damage potential of buildings adjacent to a braced excavation[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2009, 135(12): 1823 – 1835.
- [13] 龚晓南, 高有潮. 深基坑工程施工设计手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1998. (GONG Xiao-nan, GAO You-chao. Construction and design manual of deep excavation engineering[M]. Beijing: China Architecture and

- Building Press, 1998. (in Chinese))
- [14] JGJ 120—2012 建筑基坑支护技术规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012. (JGJ 120—2012 Technical specification for retaining and protection of building foundation excavations[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2012. (in Chinese))
- [15] GB50497—2009 建筑基坑工程监测技术规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2009. (GB50497—2009 Technical code for monitoring of building foundation pit engineering[S]. Beijing: China Planning Press, 2009. (in Chinese))
- [16] DB29—202—2010 建筑基坑工程技术规程[S]. 2010. (DB29—202—2010 Technical specification for retaining and protection of building foundation excavation[S]. 2010. (in Chinese))
- [17] 郑刚, 李志伟. 不同围护结构变形形式的基坑开挖对邻近建筑物的影响对比分析[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(6): 970—977. (ZHENG Gang, LI Zhi-wei. Comparative analysis of responses of buildings adjacent to excavations with different deformation modes of retaining walls[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(6): 970—977. (in Chinese))
- [18] 徐中华, 王卫东. 敏感环境下基坑数值分析中土体本构模型的选择[J]. 岩土力学, 2010, 31(1): 258—326. (XU Zhong-hua, WANG Wei-dong. Selection of soil constitutive models for numerical analysis of deep excavations in close proximity to sensitive properties[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(1): 258—326. (in Chinese))
- [19] VUCETIC M, DOBRY R. Effect of soil plasticity on cyclic response[J]. Journal of Geoenvironmental Engineering, 1991, 171(1): 89—107.
- [20] OU C Y, LIAO J T, LIN H D. Performance of diaphragm wall construction using top-down method[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1998, 124(9): 798—808.

《岩土工程学报》征订启事

《岩土工程学报》创办于1979年, 是我国水利、土木、力学、建筑、水电、振动等六个全国性学会联合主办的学术性科技期刊。由南京水利科学研究院承办, 国内外公开发行。主要刊登土力学、岩石力学领域中能代表当今先进理论和实践水平的科学研究和工程实践成果等。报道新理论、新技术、新仪器、新材料的研究和应用。欢迎国家自然科学基金项目及其他重要项目的研究成果向本刊投稿, 倡导和鼓励有实践经验的作者撰稿, 并优先利用这些稿件。主要栏目有黄文熙讲座、综述、论文、短文、工程实录、焦点论坛、讨论和简讯等。

本刊被《中文核心期刊要目总览》连续多年确认为核心期刊, 并在建筑类核心期刊中位于前列; 本刊被科技部“中国科技论文统计源期刊”(中国科技核心期刊)及“中国科技论文与引文数据库”收录; 本刊被中国科学院“中国科学引文数据库”收录; 本刊被“中国知网”全文收录及“中国学术期刊综合评价数据库”收录; 本刊被“工程索引 Ei Compendex 数据

库”和“日本科学技术振兴机构数据库 JST”等国际数据库收录。本刊网址 (www.cgejournal.com) 全文发布本刊所有刊载文章。

本刊读者对象为土木建筑、水利电力、交通运输、矿山冶金、工程地质等领域中从事岩土工程及相关专业的科研人员、设计人员、施工人员、监理人员和大专院校师生。

本刊为月刊, A4 开, 双栏排版, 192 页, 每月中旬出版, 每期定价 25 元, 全年 300 元。

本刊国际标准刊号 ISSN 1000—4548, 国内统一刊号 CN 32—1124/TU, 国内发行代号 28—62, 国外发行代号 MO 0520。欢迎广大读者在全国各地邮局订购, 也可在编辑部订购(不另收邮费)。编辑部订购地址: 南京虎踞关 34 号《岩土工程学报》编辑部; 邮编: 210024; 联系电话: (025) 85829534, 85829543, 85829553, 85829556; 传真: (025) 85829555; E-mail: ge@nhri.cn。

(本刊编辑部)