

DOI: 10.11779/CJGE2014S2063

# 北京市轨道交通基坑工程桩体变形特性

吴锋波<sup>1</sup>, 金 淮<sup>1</sup>, 朱少坤<sup>2</sup>

(1. 北京城建勘测设计研究院有限责任公司, 北京 100101; 2. 邢台万信工程设计咨询有限公司, 河北 邢台 054000)

**摘 要:** 根据基坑开挖深度、地层条件的不同, 对北京市轨道交通 80 个明挖顺作法基坑工程实测结果进行统计分析, 研究确定北京砂卵石和黏性土地区深基坑开挖引起的桩体变形规律。研究表明: ①围护桩顶和桩体均存在向基坑内和基坑外两个方向的水平位移, 水平位移实测结果分布形态均近似符合正态分布。②围护桩整体最大变形均以桩体变形为主, 桩向基坑内水平位移平均值约为  $0.05\%H \sim 0.12\%H$ , 向基坑外水平位移平均值约为  $0.02\%H \sim 0.07\%H$ 。③插入比、长宽比、基坑系统刚度等对桩的最大水平位移有一定的影响。④桩向基坑内水平位移最大值主要出现在  $0.26H \sim 0.45H$  处, 向基坑外水平位移最大值主要出现在  $0.18H \sim 0.20H$  处。研究成果可对未来北京及其他地区城市轨道交通基坑工程变形大小及安全性的预测和评估, 指导基坑工程设计与施工工作, 对防止基坑事故的发生具有重要意义。

**关键词:** 城市轨道交通; 基坑工程; 桩体变形特性

中图分类号: TU470

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 4548(2014)S2 - 0360 - 08

**作者简介:** 吴锋波(1982 - ), 男, 博士, 主要从事城市轨道交通工程安全风险评估和监测研究。E-mail: wufengbo820424@163.com。

## Deformation characteristic of piles foundation pit engineering of urban rail transit in Beijing

WU Feng-bo<sup>1</sup>, JIN Huai<sup>1</sup>, ZHU Shao-kun<sup>2</sup>

(1. Beijing Urban Construction Exploration and Surveying Design Research Institute Co., Ltd., Beijing 100101, China; 2. Xingtai Wanxin Engineer Design Co., Ltd., Xingtai 054000, China)

**Abstract:** According to the difference of excavation depth and the formation conditions, 80 case histories of foundation pit engineering of urban rail transit in Beijing are analyzed. The deformation laws of piles excavation induced by foundation pit engineering are studied in Beijing sand & gravel zone and clay soil zone. The results show that: (1) The horizontal displacements of retaining piles at top and body are in two directions, that is, towards and out of the foundation pit and the measured displacements are approximately in normal distribution. (2) The maximum pile deformation is the pile body deformation. The maximum pile deformation is about  $0.05\%H \sim 0.12\%H$  towards the foundation pit and about  $0.02\%H \sim 0.07\%H$  out of the foundation pit. (3) The insertion ratio, the ratio of length to width and the system stiffness have certain influence on the maximum pile deformation. (4) The maximum value of horizontal displacement of piles towards the foundation pit mainly appears at  $0.26H \sim 0.45H$ , and the maximum value of horizontal displacement of piles out of the foundation pit mainly appears at  $0.18H \sim 0.20H$ . The results can be used to predict the lateral deformation of similar projects in Beijing and other areas and to guide the design and constructions. It also has great significance for preventing accidents foundation pits.

**Key words:** urban rail transit; foundation pit engineering; pile deformation characteristic

## 0 引 言

北京城市轨道交通工程始建于 1965 年, 地铁 1 号线一期工程全长 23.6 km, 于 1969 年 10 月 1 日建成通车, 是中国大陆第一个城市轨道交通系统。随着我国城市轨道交通的蓬勃发展, 北京市积极开展相关建设工作, 截至 2013 年底在建线路 7 条, 在建总里程达到了 117.209 km; 运营线路 17 条, 运营总里程达到了 455 km。北京市已经构建了复杂的城市轨道交通

网络。2020 年北京市轨道交通线网规划达到了 30 条, 共计 1050 km, 工程建设将迎来新的高峰。

基坑工程是城市轨道交通车站建设的主要方式, 其具有开挖面积、深度较大, 围(支)护结构形式多, 地质条件、环境条件复杂等特点。需深入研究基坑工程的变形特性, 以合理控制基坑工程的变形, 保护工

程自身和周边环境的安全。

国内外在基坑工程变形特性研究方面积累了一些研究成果。Peck<sup>[1]</sup>、Long<sup>[2]</sup>、Moormann<sup>[3]</sup>分析了世界范围内的基坑工程实测数据, 得出了墙体侧移与开挖深度、支护系统刚度等的关系, 并分析对比不同的开挖方法、支护方式下墙体变形特性的差异。Clough 等<sup>[4]</sup>研究了硬黏土、残积土和砂土地层中基坑围护结构最大侧移、最大地表沉降与开挖深度  $H$  之间的关系。Masuda<sup>[5]</sup>分析了日本各地 52 个基坑的地下连续墙监测数据。Ou 等<sup>[6]</sup>分析了台北软土地区 10 个基坑的实测数据。Carder<sup>[7]</sup>分析了英国硬黏土地区基坑灌注桩和地下连续墙的实测数据。Yoo<sup>[8]</sup>分析了韩国首尔地区为主的 62 个深基坑的实测数据, 得出了基坑变形与基坑深度等的相关关系。

近年来, 国内基坑工程建设不断开展, 相关方面也进行了深入研究。刘兴旺等<sup>[9]</sup>分析了杭州及上海等软土地区 15 个顺作法施工的基坑工程实测资料。Wang 等<sup>[10]</sup>分析了上海明珠二期地铁 6 个车站基坑的实测数据。徐中华<sup>[11-12]</sup>、王卫东等<sup>[13]</sup>统计分析了上海地区大量深基坑的变形数据。

目前, 北京地区相关研究针对单独某个基坑的变形结果进行分析的较多, 缺乏建立在大量基坑工程案例基础上的综合分析。李淑等<sup>[14]</sup>分析了北京地区 37 个深基坑的开挖实测结果, 研究了基坑桩墙体的变形特点。

随着北京市轨道交通工程建设的不断开展, 基坑工程的实测资料大量积累, 基于海量实测数据的统计分析和变形特性研究, 对掌控基坑工程的安全状态, 合理控制基坑变形等具有重大的意义且十分必要。

## 1 基坑工程案例收集

本文基于北京市轨道交通 6 号线、7 号线、8 号线、9 号线、10 号线、14 号线、15 号线、房山线和亦庄线等 9 条线路、80 个基坑工程案例, 对其桩体变形实测结果进行分析, 以研究围护桩变形的特点。其中, 包含 66 个明挖车站和 14 个明挖区间。这些数据均为第三方监测成果, 较为真实、可靠。

所收集基坑工程长度一般在 400 m 以内, 个别明挖区间的基坑长度较大; 明暗挖结合施工的车站工程的开挖长度较小, 一般小于 100 m。基坑开挖深度主要在 40 m 范围之内。基坑工程的空间尺寸参数见图 1。

80 个基坑工程均采用明挖顺作法施工, 支护形式主要为钻孔灌注桩+钢管内支撑, 个别基坑为钻孔灌注桩+锚杆或锚索支护。统计内容主要为桩顶最大水平位移、桩体最大水平位移和桩体最大水平位移发生

的位置等。

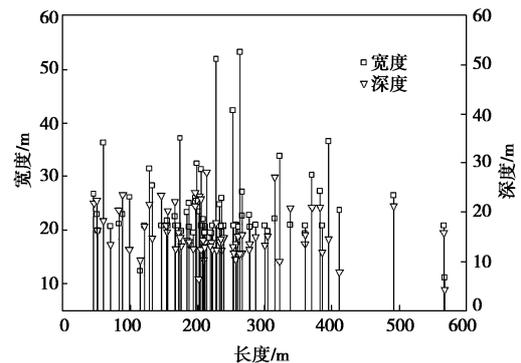


图 1 基坑工程空间尺寸

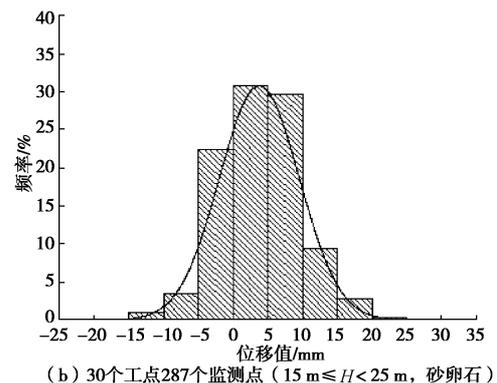
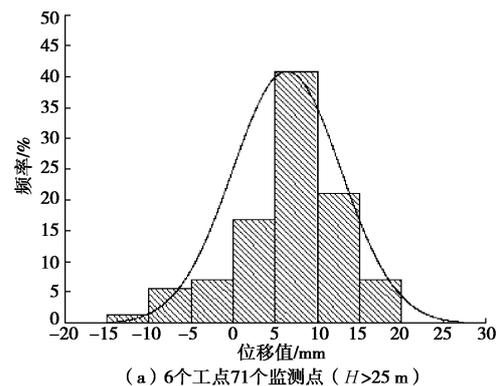
Fig. 1 Spatial size of foundation pit engineering

根据北京市轨道交通基坑深度特点, 将其深度分为  $H < 15$  m 以下、 $15 \text{ m} \leq H < 25$  m 和  $H > 25$  m 3 个等级分别进行分析研究。同时, 根据北京市地质特点和基坑开挖范围内岩土体条件的不同, 将开挖地层分为砂卵石地层(主要位于城市西部地区)和黏性土地层(主要位于城市东部地区)两大类分别进行分析研究, 两个地区的基坑工程数量均为 40 个。

## 2 桩体变形值分布形态

### 2.1 桩顶水平位移

桩顶水平位移反映桩顶部的变形情况, 与地表变形直接相关, 是反映基坑安全状况的重要指标。58 个工点的桩顶水平位移监测统计结果见图 2 和表 1。



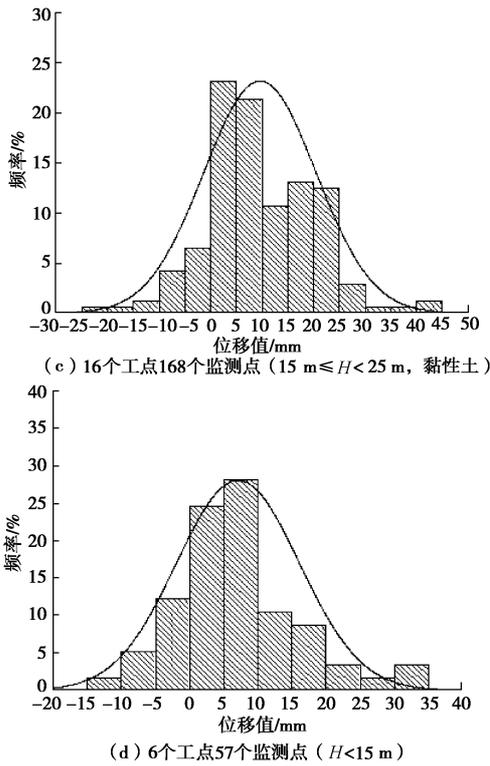


图2 58个基坑工程桩顶水平位移分布频率直方图

Fig. 2 Histogram of horizontal displacement frequency of pile top including 58 foundation pits

表1 桩顶水平位移统计结果

Table 1 Statistical results of horizontal displacement at pile top

基坑深度	主要地层	位移方向	最大值/mm	最小值/mm	平均值/mm	标准差
25 m以上	砂卵石	向基坑外	-10.2	-0.4	-5.6	2.9
		向基坑内	19.5	0.1	8.3	4.5
15 m~25 m (含15 m)	砂卵石	向基坑外	-13.1	-0.1	-2.8	2.9
		向基坑内	21.9	0.2	6.2	4.4
15 m以下	黏性土	向基坑外	-22.7	-0.3	-6.4	5.5
		向基坑内	52.1	0.1	12.0	9.4
15 m以下	—	向基坑外	-11.2	-0.1	-4.2	3.4
		向基坑内	34.1	0.1	9.8	7.7

由图2和表1可知, 围护桩顶水平位移实测结果分布形态近似符合正态分布(图中拟合曲线为正态分布曲线), 桩顶均出现向基坑内、外的水平位移。一般桩顶向基坑内的水平位移最大值和平均值均大于向基坑外的水平位移, 桩顶以向基坑内的水平位移为主, 但基坑工程桩顶变形仍需进行两个方向的控制。

基坑开挖深度  $5\text{ m} \leq H < 25\text{ m}$  的桩顶变形结果表明, 黏性土地区基坑桩顶水平位移数值整体较砂卵石地区的数值大一些, 桩顶向基坑内水平位移的最大值超过了后者的1倍。同时, 黏性土地区桩顶变形分布较为离散, 数据标准差均大于砂卵石地区。

### 2.2 桩体水平位移

基坑开挖深度较大时, 围护桩体水平位移逐渐增大, 桩体腹部向基坑内突出, 可形成抛物线型位移。46个工点的桩体水平位移监测统计结果见图3和表2。

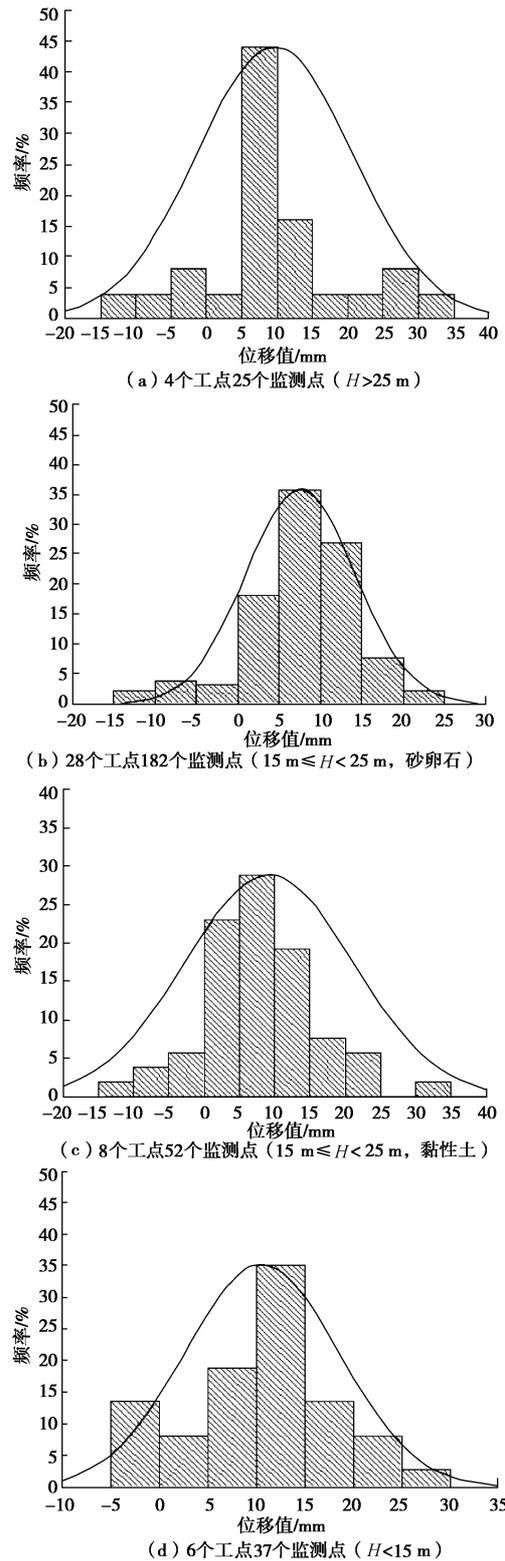


图3 46个基坑工程桩体水平位移分布频率直方图

Fig. 3 Histogram of horizontal displacement frequency of pile body including 46 foundation pits

由图3和表2可知, 围护桩体水平位移实测结果分布形态也近似符合正态分布, 桩体均出现向基坑内、外的水平位移。一般桩体向基坑内的水平位移最大值和平均值均大于向基坑外的水平位移, 桩体以向基坑内的水平位移为主。采用灌注桩围护时, 在支撑作用

下基坑侧壁土体可通过桩间裂缝挤出, 致使桩体出现向基坑外侧的变形。向基坑外的水平位移数值相对较小, 但也需对其变形进行控制。

表 2 桩体水平位移统计结果

Table 2 Statistical results of horizontal displacement of pile body

基坑深度	主要地层	位移方向	最大值/mm	最小值/mm	平均值/mm	标准差
25 m 以上	砂卵石	向基坑外	-13.5	-4.0	-7.3	4.3
		向基坑内	33.6	2.8	12.9	8.6
15 m~25 m (含 15 m)	砂卵石	向基坑外	-14.5	-0.7	-6.9	3.7
		向基坑内	24.7	0.4	9.0	4.8
15 m 以下	黏性土	向基坑外	-12.8	-1.6	-6.2	3.9
		向基坑内	33.4	1.1	11.2	11.1
15 m 以下	—	向基坑外	-4.5	-2.5	-3.7	6.0
		向基坑内	25.2	2.2	3.7	0.8

基坑开挖深度  $5\text{ m} \leq H < 25\text{ m}$  的桩体变形结果表明, 黏性土地区基坑桩体水平位移数值较大, 且分布相对离散。基坑深度较大时 ( $H > 25\text{ m}$ ), 砂卵石地区基坑桩体也可出现较大的水平位移。

### 3 围护桩的变形特性

#### 3.1 桩顶水平位移特性

##### (1) 桩顶水平位移与桩最大水平位移的关系

桩整体最大水平位移数值是桩顶水平位移和桩体水平位移两者的最大值。图 4 为桩顶向基坑内水平位移与桩整体向基坑内最大水平位移的关系, 由该图可知基坑桩顶水平位移大部分小于桩整体的最大水平位移。

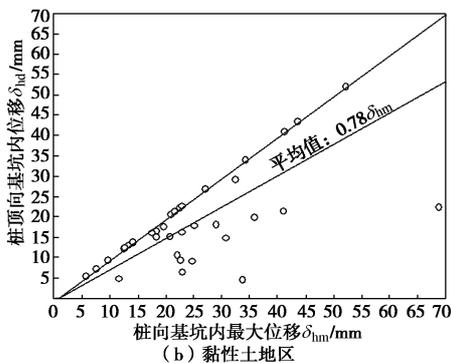
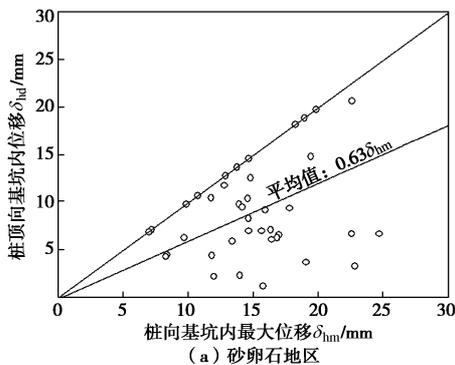


图 4 桩顶向基坑内水平位移

Fig. 4 Horizontal displacement at pile top towards pit  
砂卵石地区基坑桩顶水平位移的平均值约为桩

整体最大水平位移的 0.63 倍, 黏性土地区基坑桩顶水平位移的平均值相对砂卵石地区要大一些, 约为桩整体最大水平位移的 0.78 倍。

##### (2) 桩顶水平位移与基坑开挖深度的关系

图 5 为桩顶水平位移与基坑开挖最大深度的关系, 由该图可知桩顶水平位移一般随着基坑开挖深度的增大而增大。

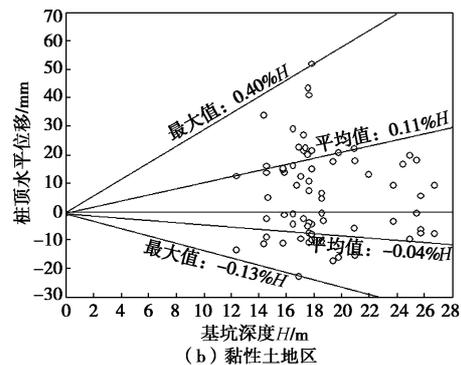
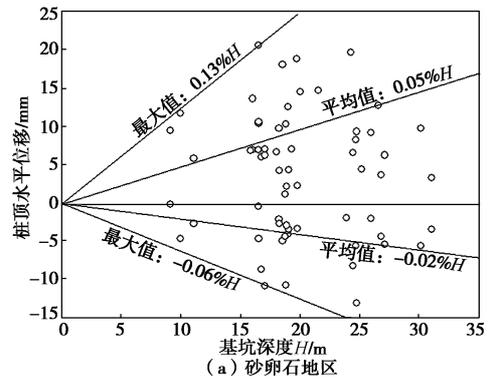


图 5 桩顶水平位移与基坑开挖深度的关系

Fig. 5 Relationship between horizontal displacement at pile top and pit depth

砂卵石地区桩顶水平位移数值相对较小, 桩顶向基坑内水平位移最大值约为  $0.13\%H$ , 平均值约为  $0.05\%H$ ; 桩顶向基坑外水平位移最大值约为  $0.06\%H$ , 平均值约为  $0.02\%H$ 。

黏性土地区桩顶水平位移数值相对较大, 桩顶向基坑内水平位移最大值约为  $0.40\%H$ , 平均值约为  $0.11\%H$ ; 桩顶向基坑外水平位移最大值约为  $0.13\%H$ , 平均值约为  $0.04\%H$ 。

##### (3) 插入比对桩顶水平位移的影响

插入比是灌注桩在坑底以下的深度与基坑开挖深度的比, 它是衡量基坑经济性的一个重要指标。图 6 为桩顶水平位移与插入比的关系。

由图 6 (a) 可知, 砂卵石地区桩顶向基坑内的水平位移随插入比的增大而减小, 减小的速度随插入比的增大而减缓。插入比小于 0.3 时, 桩顶水平位移随插入比的增大而迅速减小; 当插入比为 0.3~0.4 时,

拟合曲线出现拐点, 桩顶水平位移随插入比减小的速度较前一阶段明显减小; 当插入比大于0.4 时, 拟合曲线趋于平缓, 增大插入比对减小变形无明显作用。桩顶出现向基坑外的水平位移主要集中在插入比为0.2~0.35的区段。

由图6 (b) 可知, 插入比小于0.38时, 黏性土地区桩顶向基坑内的水平位移随插入比的增大而增大; 插入比大于0.38时, 桩顶向基坑内的水平位移随插入比的增大而减小。桩顶出现向基坑外的水平位移主要集中在插入比为0.16~0.38的区段。

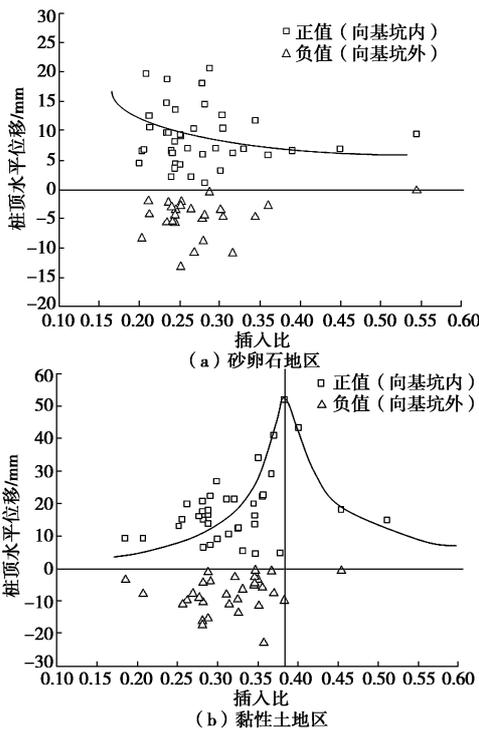


图6 桩顶水平位移与插入比的关系

Fig. 6 Relationship between horizontal displacement at pile top and insertion ratio

### 3.2 桩体水平位移特性

#### (1) 桩体水平位移与桩最大水平位移的关系

图7 为桩体向基坑内水平位移与桩整体向基坑内最大水平位移的关系, 由该图可知基坑桩体水平位移一般近接于桩整体的最大水平位移, 即桩整体的最大水平位移主要为桩体水平位移。

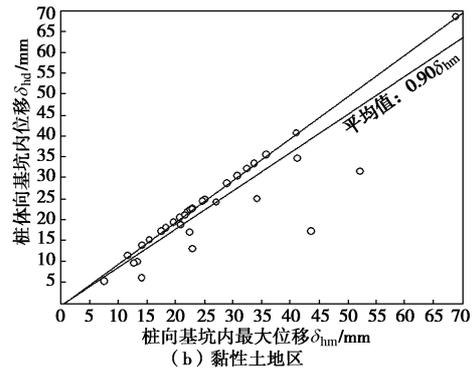
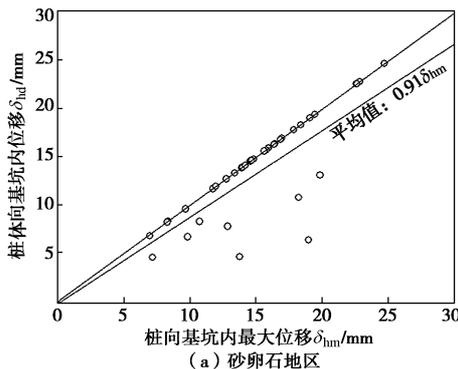


图7 桩体向基坑内水平位移

Fig. 7 Horizontal displacement of pile body towards pit

砂卵石地区和黏性土地区的基坑桩体水平位移的平均值分别约为桩整体最大水平位移的 0.91 倍和 0.90 倍。两个地区桩整体最大变形均以桩体变形为主。

#### (2) 桩体水平位移与基坑开挖深度的关系

图8 为桩体水平位移与基坑开挖最大深度的关系, 由该图可知桩体水平位移一般随着基坑开挖深度的增大而增大。

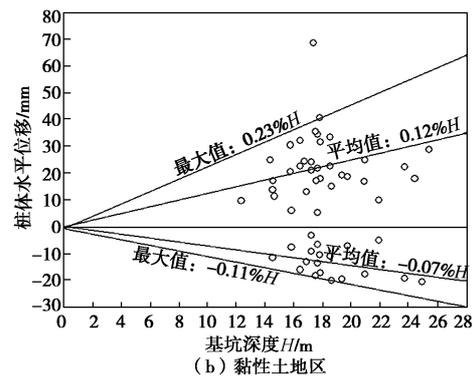
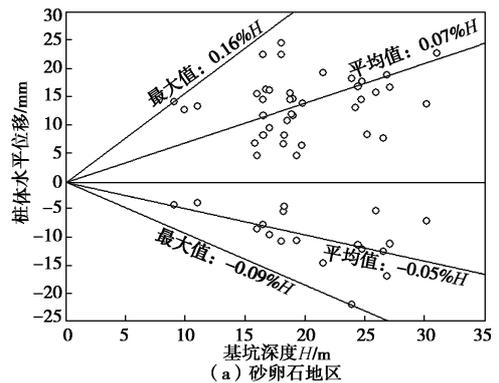


图8 桩体水平位移与基坑深度的关系

Fig. 8 Relationship between horizontal displacement at pile body and pit depth

砂卵石地区桩体水平位移数值相对较小, 桩体向基坑内水平位移最大值约为 0.16% $H$ , 平均值约为 0.07% $H$ ; 桩体向基坑外水平位移最大值约为 0.09% $H$ , 平均值约为 0.03% $H$ 。

黏性土地区桩体水平位移数值相对较大, 桩顶向基坑内水平位移最大值约为 0.23% $H$ , 平均值约为

0.12% $H$ ; 桩顶向基坑外水平位移最大值约为 0.11% $H$ , 平均值约为 0.07% $H$ 。

李淑等<sup>[14]</sup>统计的北京地区桩体水平位移平均值约为 0.1% $H$ , 与本文统计结果较为接近。

### (3) 插入比对桩体水平位移的影响

图9为桩体水平位移与插入比的关系。由图9(a)可知, 砂卵石地区桩体向基坑内外的水平位移均随插入比的增大而减小, 减小的速度随插入比的增大而减缓。插入比小于0.3时, 桩体水平位移随插入比的增大而迅速减小; 当插入比为0.3~0.4时, 拟合曲线出现拐点, 桩顶水平位移随插入比减小的速度较前一阶段明显减小; 当插入比大于0.4时, 拟合曲线趋于平缓。

由图9(b)可知, 黏性土地区桩体向基坑内的水平位移均随插入比的增大而减小, 减小的速度随插入比的增大而减缓。插入比小于0.35时, 桩体水平位移随插入比的增大而迅速减小; 当插入比为0.35~0.45时, 拟合曲线出现拐点, 桩顶水平位移随插入比减小的速度较前一阶段明显减小; 当插入比大于0.45时, 拟合曲线趋于平缓。桩体出现向基坑外的水平位移主要集中在插入比为0.25~0.40的区段。

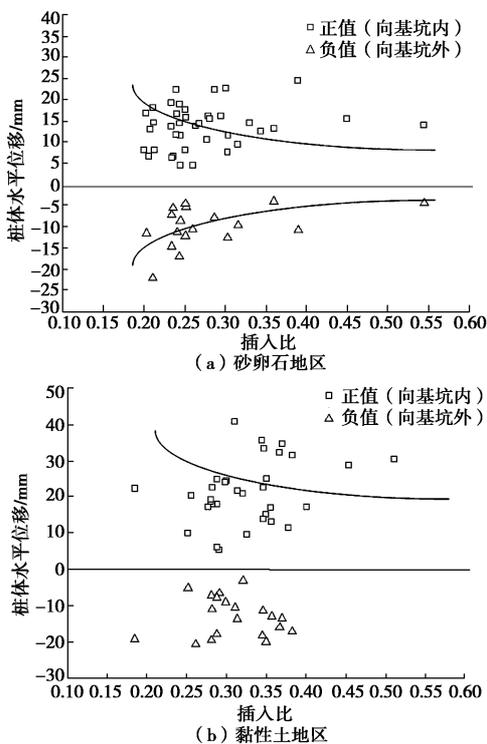


图9 桩体水平位移与插入比的关系

Fig. 9 Relationship between horizontal displacement of pile body and insertion ratio

### 3.3 长宽比对桩最大水平位移的影响

Clough等<sup>[4]</sup>研究表明基坑开挖长度与宽度之比对基坑稳定性具有较大影响。软土地区基坑研究表明开

挖面积相同时方形基坑变形较大, 其次为椭圆基坑、圆形基坑。

图10为桩最大水平位移与基坑长宽比的关系。由图10(a)可知, 砂卵石地区基坑长宽比主要在1~19, 桩体向基坑内外的最大水平位移均随基坑长宽比的增大略有减小。由图10(b)可知, 黏性土地区基坑长宽比主要在1~27, 桩体向基坑内外的最大水平位移均随基坑长宽比的增大略有减小, 向基坑内水平位移受基坑长宽比影响稍大些。

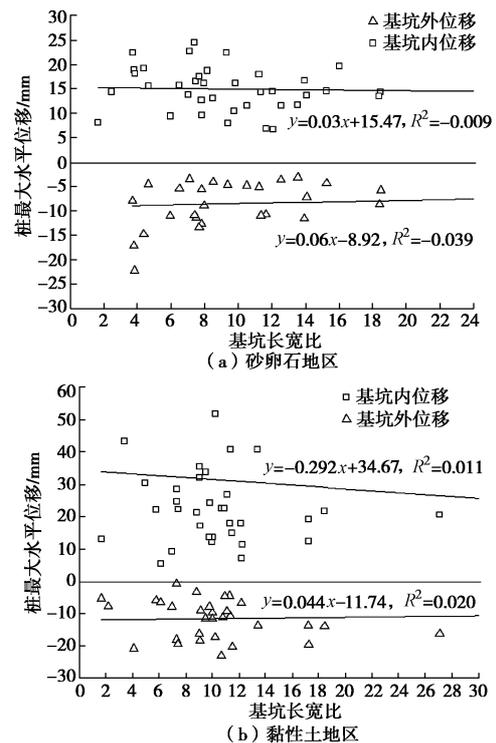


图10 基坑长宽比对桩最大水平位移的影响

Fig. 10 Maximum horizontal displacement of piles with different ratios of pit length to width

### 3.4 基坑系统刚度对桩最大水平位移的影响

根据Clough等<sup>[4]</sup>的定义, 基坑支撑系统刚度为

$$K = \frac{E_w I}{\gamma_w h^4}, \quad (1)$$

式中,

$$I = \frac{t^3}{12}, \quad (2)$$

其中,  $E_w I$ 为围护墙体的水平抗弯刚度,  $h$ 为支撑竖向平均间距,  $\gamma_w$ 为水的重度,  $t$ 为围护墙体的等效厚度, 根据刚度相等的原则, 将钻孔灌注桩围护墙体的刚度等效为地下连续墙的刚度, 计算式为

$$\frac{1}{12}(D+s)t^3 = \frac{1}{64}\pi D^4, \quad (3)$$

$$t = 0.838D \sqrt[3]{\frac{1}{1 + \frac{s}{D}}}, \quad (4)$$

式中,  $D$  为钻孔灌注桩直径,  $s$  为桩净距。

图11为无量纲化桩最大水平位移与基坑支撑系统刚度之间的关系。由图11 (a) 可知, 砂卵石地区基坑支撑系统刚度主要为5000~35000, 支撑系统刚度小于15000时, 随着支撑系统刚度的增大无量纲化桩最大水平位移数值逐渐增大, 之后逐渐减小。

由图11 (b) 可知, 黏性土地区基坑支撑系统刚度主要为4000~20000, 随着支撑系统刚度的增大无量纲化桩最大水平位移数值逐渐减小。当支护体系具有一定刚度后, 通过加大支护体系刚度来减小基坑变形效果不明显。

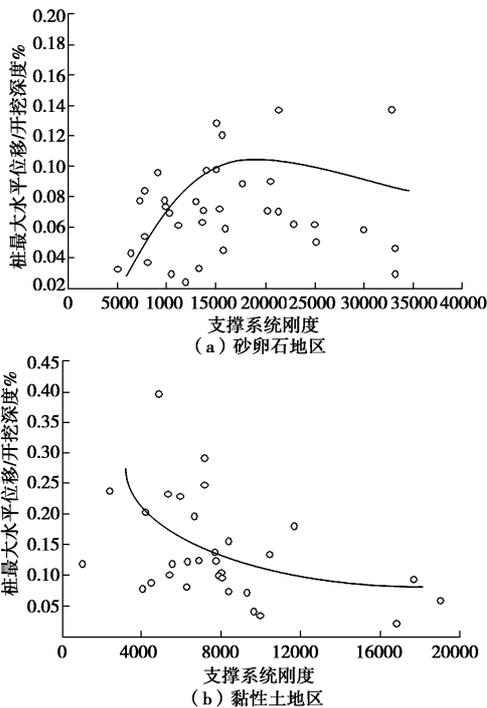


图 11 基坑系统刚度对桩最大水平位移的影响

Fig. 11 Maximum horizontal displacement of piles with different pit system stiffnesses

### 3.5 桩体最大变形的的位置

图12, 13为桩体变形的最大位置。由图12 (a) 可知, 砂卵石地区桩体向基坑内水平位移出现最大值的位置在地表以下7 m, 出现位置与基坑深度比值的最大值约为0.66H, 平均值约为0.26H。由图12 (b) 可知, 黏性土地区桩体向基坑内水平位移出现最大值的位置在地表以下12 m, 出现位置与基坑深度比值的最大值约为0.73H, 平均值约为0.45H, 最大值和平均值均大于砂卵石地区的桩体。

由图13 (a) 可知, 砂卵石地区桩体向基坑外水平位移出现最大值的位置也在地表以下7 m, 出现位置与基坑深度比值的最大值约为0.77H, 平均值约为0.18H。由图13 (b) 可知, 黏性土地区桩体向基坑外水平位移出现最大值的位置在地表以下14 m, 出现位置与基坑深度比值的最大值约为0.64H, 平均值约为

0.20H, 平均值与砂卵石地区的桩体相近。

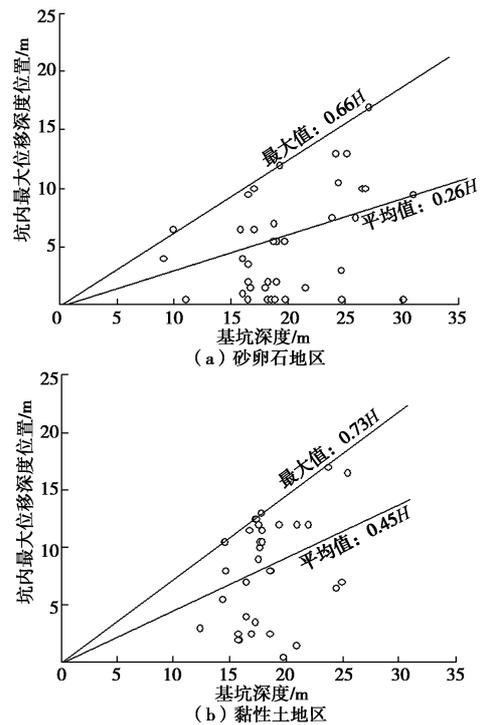


图 12 桩体向基坑内最大变形的的位置

Fig. 12 Maximum horizontal displacement position of pile body towards pit

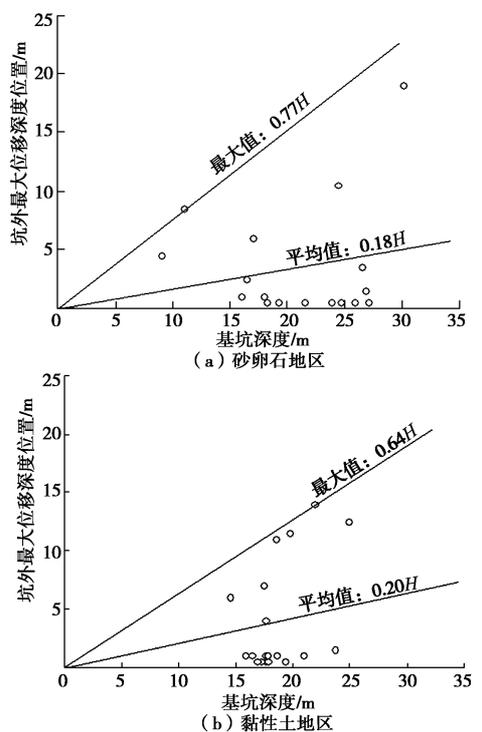


图 13 桩体向基坑外最大变形的的位置

Fig. 13 Maximum horizontal displacement position of pile body out of pit

## 4 结 论

通过北京市 80 个城市轨道交通基坑工程案例的统计分析, 研究了基坑围护桩的变形特性, 得到结论

如下:

(1) 围护桩顶水平位移和桩体水平位移实测结果分布形态均近似符合正态分布, 桩顶和桩体均存在向基坑内和基坑外两个方向的位移。基坑深度相近时, 黏性土地区基坑桩顶和桩体水平位移数值整体大于砂卵石地区基坑桩顶和桩体水平位移数值。

(2) 围护桩整体最大变形均以桩体变形为主, 桩体水平位移的平均值约为桩整体最大水平位移的 0.90~0.91 倍, 桩顶水平位移的平均值约为桩整体最大水平位移的 0.63~0.78 倍。

(3) 砂卵石地区桩向基坑内水平位移平均值约为  $0.05\%H \sim 0.07\%H$ , 向基坑外水平位移平均值约为  $0.02\%H \sim 0.03\%H$ ; 黏性土地区桩向基坑内水平位移平均值约为  $0.11\%H \sim 0.12\%H$ , 向基坑外水平位移平均值约为  $0.04\%H \sim 0.07\%H$ 。

(4) 砂卵石地区桩顶向基坑内的水平位移随插入比的增大而减小, 黏性土地区桩顶向基坑内的水平位移随插入比的增大而先增大后减小。桩体的水平位移均随插入比的增大而减小。

(5) 基坑长宽比对桩最大水平位移的影响较小, 随着基坑支撑系统刚度的增大, 砂卵石地区无量纲化桩最大水平位移数值先增大后减小, 黏性土地区无量纲化桩最大水平位移数值逐渐减小。

(6) 桩体向基坑内水平位移出现最大值的平均位置在  $0.26H \sim 0.45H$ , 向基坑外水平位移出现最大值的平均位置在  $0.18H \sim 0.20H$ 。

#### 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. Mexico, 1969: 225 - 290.
- [2] LONG M. Database for retaining wall and ground movements due to deep excavations[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 2001, 127(33): 203 - 224.
- [3] MOORMANN C. Analysis of wall and ground movements due to deep excavations in soft soil based on a new worldwide database[J]. Soils and Foundations, 2004, 44(1): 87 - 98.
- [4] CLOUGH G W, O'ROURKE T D. Construction induced movements of in situ walls[C]// Proceedings, ASCE Conference on Design and Performance of Earth Retaining Structures, Geotechnical Special Publication No. 25. New York: ASCE, 1990: 439 - 470.
- [5] MASUDA T. Behavior of deep excavation with diaphragm wall[D]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology (MIT), 1993.
- [6] OU C Y, HSIEH P G, CHIOU D C. Characteristics of ground surface settlement during excavation[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1993, 30(5): 758 - 767.
- [7] CARDER D R. Ground movements caused by different embedded retaining wall construction techniques[R]. Transport Research Laboratory Report 172, Berkshire, U.K., 1995.
- [8] YOO C. Behavior of braced and anchored walls in soils overlying rock[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 2001, 127(3): 225 - 233.
- [9] 刘兴旺, 施祖元, 益德清, 等. 软土地区基坑开挖变形性状研究[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(4): 456 - 460. (LIU Xing-wang, SHI Zu-yuan, YI De-qing, et al. Deformation characteristics analysis of braced excavation on soft clay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1999, 21(4): 456 - 460. (in Chinese))
- [10] WANG Z W, NG C W W, LIU G B. Characteristics of wall deflections and ground surface settlements in Shanghai[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2005, 42(5): 1243 - 1254.
- [11] 徐中华. 上海地区支护结构与主体地下结构相结合的深基坑变形性状研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2007. (XU Zhong-hua. Deformation behavior of deep excavations supported by permanent structure in Shanghai soft deposit[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2007. (in Chinese))
- [12] 徐中华, 王卫东. 深基坑变形控制指标研究[J]. 地下空间与工程学报, 2010, 6(3): 619 - 626. (XU Zhong-hua, WANG Wei-dong. Deformation control criteria of deep excavations[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2010, 6(3): 619 - 626. (in Chinese))
- [13] 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))
- [14] 李 淑, 张顶立, 房 倩, 等. 北京地区深基坑墙体变形特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(11): 2344 - 2353. (LI Shu, ZHANG Ding-li, FANG Qian. Research on characteristics of retaining wall deformation due to deep excavation in Beijing[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(11): 2344 - 2353. (in Chinese))

(本文责编 胡海霞)