

宁波地铁窄基坑抗隆起稳定性及变形特性研究

姚任行¹ 邱豪磊² 安 然² 成怡冲² 龚迪快²

(1. 宁波市轨道交通集团有限公司建设分公司, 315100, 宁波;

2. 浙江华展研究设计院股份有限公司, 315012, 宁波)

摘 要 [目的]与宽基坑相比,窄基坑开挖引起的基坑坑底和坑外土体的应力场和位移场变化更小。现行规范规定的相关计算方法鲜有考虑基坑宽度的影响,易导致围护墙设计偏于保守,造成浪费。有必要对窄基坑抗隆起稳定性及变形特性进行研究。[方法]针对宁波地区3类典型地铁基坑,采用上海市《基坑工程技术规范》规定的方法及改进方法分别计算坑底抗隆起稳定性。基于计算结果的对比给出了围护墙深优化建议。基于宁波地铁车站基坑信息,系统地分析了基坑变形与坑底抗隆起安全稳定系数的关系及基坑宽度对基坑变形的影响。[结果及结论]坑底抗隆起稳定性系数随嵌固深度的变化曲线呈多线段形式,转折点在软硬土层分界处;墙深优化空间与嵌固比、土体抗剪强度指标及是否考虑地基加固有关;围护墙平均侧移和坑外地面平均沉降的离散性较大;随坑底抗隆起系数的增大,基坑变形上界有逼近下界的趋势,这主要和工程地质条件有关;土体变形值及影响范围随基坑宽度的减小而减小,与嵌固深度的关系不大。

关键词 地铁;窄基坑;坑底抗隆起稳定性;变形特性;宽度效应

中图分类号 TU433

DOI:10.16037/j.1007-869x.2025.04.038

Study on Anti-Heave Stability and Deformation Characteristics of Narrow Foundation Pits in Ningbo Metro

YAO Renxing¹, QIU HaoLei², AN Ran², CHENG Yichong², GONG Dikuai²

(1. Ningbo Rail Transit Group Co., Ltd., Construction Branch, 315100, Ningbo, China; 2. Zhejiang Huazhan Research and Design Institute Co., Ltd., 315012, Ningbo, China)

Abstract [Objective] Compared with wide foundation pits, the stress and displacement field changes of the soil at pit bottom and outside caused by narrow foundation pit excavation are smaller. The relevant calculation methods specified in current specifications rarely consider the influence of the foundation pit width, easily leading to conservative design of the retaining

wall, causing waste. It is necessary to study the basal anti-heave stability and deformation characteristics of narrow foundation pits. [Method] Aiming at three kinds of typical subway foundation pits in Ningbo, the method specified in Shanghai's Technical Codes for Foundation Pit Engineering and the improved method are used to calculate the basal anti-heave stability. Based on a comparison of the calculation results, optimization suggestions for the retaining wall depth are given. According to the foundation pit information of Ningbo Metro stations, the relationship between the foundation pit deformation and the basal anti-heave safety stability coefficient, and the influence of the foundation pit width on the foundation pit deformation are systematically analyzed. [Result & Conclusion] The curve of the basal anti-heave stability coefficient varies with the embedded depth in a segmented manner, with the turning point at the boundary between soft and hard soil layers; the wall depth optimization space is related to the embedded ratio, soil shear strength index and whether considering the foundation reinforcement; the average lateral displacement of the retaining wall and the average land subsidence outside the pit are relatively discrete; with the increase of the basal anti-heave stability coefficient, the upper limit of the foundation pit deformation tends to approach the lower limit, which is mainly related to the engineering geological conditions; the soil deformation value and the influence range decrease with the narrowing of foundation pit width, while showing little correlation with the embedded depth.

Key words metro; narrow foundation pit; basal anti-heave stability; deformation characteristics; width effect

基坑抗隆起稳定性问题和变形问题存在一定的关联性,是基坑工程中需重点关注的问题。现有研究表明,与宽基坑相比,窄基坑开挖引起的基坑坑底和坑外土体的应力场和位移场变化更小。然而文献[1-2]等现行规范规定的相关计算方法均未考虑基坑宽度的影响,易导致围护墙设计偏于保守,造成浪费。

对此,许多学者对窄基坑问题开展研究。在坑底抗隆起稳定性方面,文献[3-6]提出了窄基坑滑动模式,并形成了相应的改进方法。在基坑变形特性方面:文献[7]分析了围护结构刚度、插入比和地基加固对不同宽深比基坑变形的影响;文献[8]基于杭州某地铁车站基坑工程,研究了不同宽度基坑变形和稳定性的差异;文献[9]分析了杭州典型地层中狭长型深基坑围护墙的侧移规律,并提出了相应的预测方法。

宁波地区地铁窄基坑的设计基本遵循上海市《基坑工程技术规范》^[2]方法(以下简称“沪规法”),在实践中反映出了部分基坑设计过于保守的问题。可见,有必要对地铁窄基坑抗隆起稳定性及变形特性进行研究。本文对典型地铁窄基坑的坑底抗隆起稳定性进行探讨,并系统性地分析基坑变形与坑底抗隆起安全稳定系数之间的关系,以及基坑宽度对基坑变形的影响。

1 地铁窄基坑坑底抗隆起稳定性研究

文献[10]的研究结果表明,当基坑宽度减小至滑动面碰到对侧墙体后,滑动面安全系数会迅速增大。工程应用中一般采用现行规范^[1-2]中的圆弧滑动法验算坑底抗隆起稳定性。然而当基坑宽度较窄时,滑动面被对侧的围护墙遮挡,该方法不再适用。由此,本研究以圆弧滑动面是否被对侧的围护墙遮挡作为划分宽、窄基坑的依据。宽基坑与窄基坑示意图见图1。当图1中的 SE 长度 $>SF$ 长度时为窄基坑, SE 长度 $\leq SF$ 长度时为宽基坑^[5-6]。

一般而言,基坑宽度越小,基坑的稳定性就越好^[11],考虑基坑宽度的影响进而合理设计可以降低围护墙造价。滑弧圆心竖向移动改进法^[5](以下简称“文献[5]方法”)和抛物线型滑移面改进法^[6](以下简称“文献[6]方法”)均考虑了基坑宽度的影响,其假定的破坏滑移面可近似模拟试验和有限

元计算得出的破坏面,均为较合理的窄基坑抗隆起性能计算方法。另外,有限元强度折减法^[8](采用有限元软件模拟,以下简称“强度折减法”)也是一种考虑了窄基坑效应的抗隆起稳定性计算方法。

本文分别采用沪规法、文献[5]方法、文献[6]方法及强度折减法,对比3类典型地铁基坑(地下二层车站基坑、地下三层车站基坑及地下一层出入口基坑)在不同嵌固深度下的坑底抗隆起稳定性安全系数 K_s 。

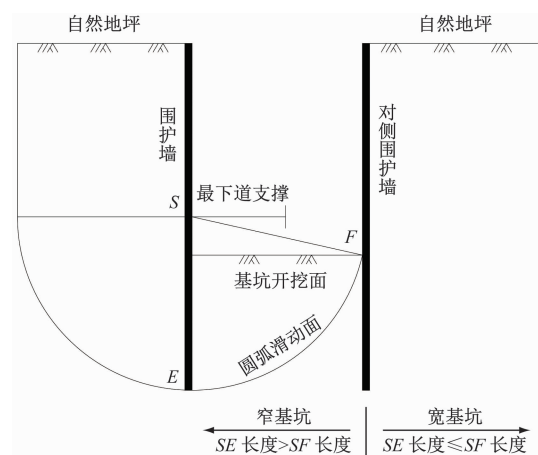


图1 宽基坑与窄基坑示意图

Fig. 1 Schematic diagram of wide and narrow foundation pits

基于宁波地铁车站基坑特点,本文采用的基坑计算参数如表1所示,其中临界嵌固深度是指 SE 长度 $=SF$ 长度时的嵌固深度,对应的嵌固比为临界嵌固比。由表1可知,与地下二层车站基坑相比,地下三层车站基坑和地下一层出入口基坑的窄基坑特性更加明显。根据宁波地区2种典型地层条件,相应工程地质参数如表2所示。

采用不同计算方法可得不同地层时的 K_s -嵌固深度曲线如图2所示。其中由于地层1以淤泥质土为主,地层1的计算中比较了有地基加固和无地基加固两种情形。

表1 基坑计算参数表

Tab. 1 Foundation pits calculation parameter table

基坑项目	基坑宽度/m	基坑深度/m	最下道支撑至坑底距离/m	临界嵌固深度/m	临界嵌固比
地下二层车站基坑	20	17	3	17.2	1.01
地下三层车站基坑	20	25	3	17.2	0.69
地下一层出入口基坑	10	10	3	7.4	0.74

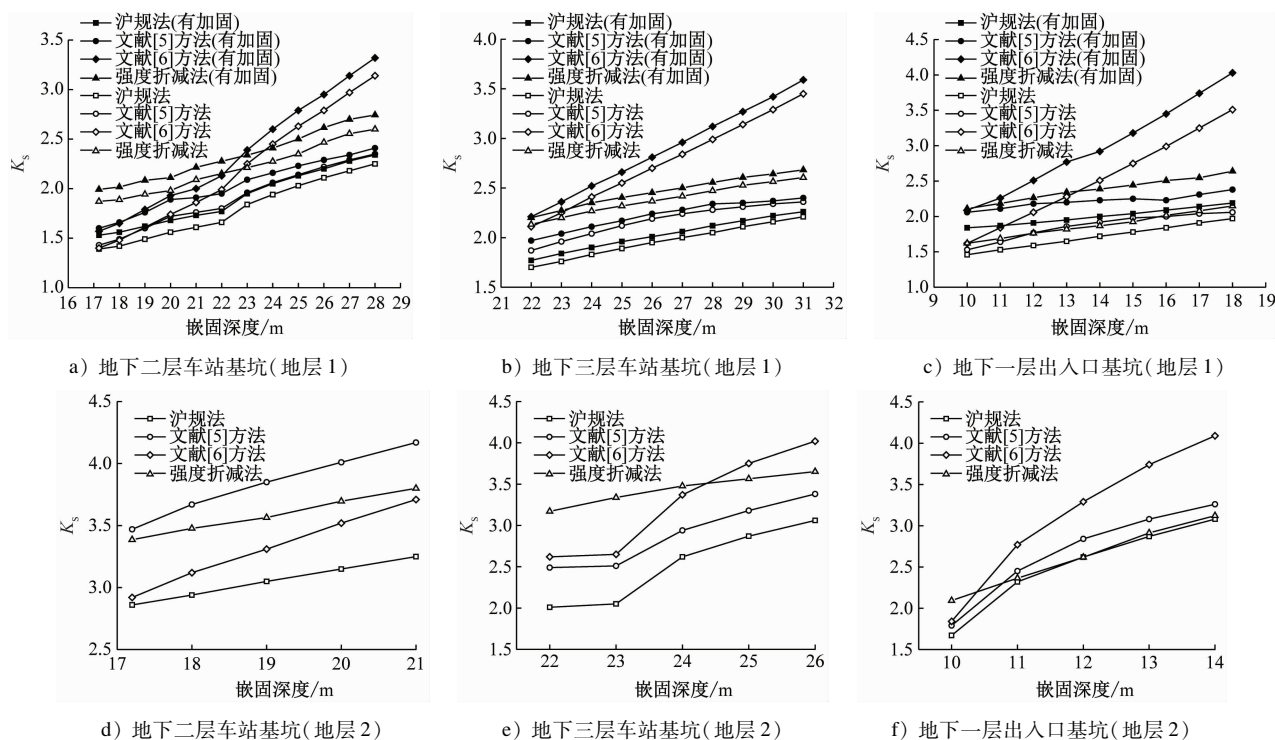
由图2可知:在不同计算方法及不同地层条件下, K_s 均随嵌固深度的增大而增大; K_s -嵌固深度曲

线均呈折线形,且转折点位于软硬土层分界处;在相同嵌固深度下,文献[6]方法的 K_s 最大,强度折

表2 工程地质参数表

Tab.2 Engineering geological parameter table

地层名称	层厚/m		重度 $\gamma/(\text{kN}/\text{m}^3)$	黏聚力 C/kPa	内摩擦角 $\Phi/(\circ)$
	地层1	地层2			
1-2 黏土	1.7	1.7	18.7	26.0	13.2
1-3b 淤泥质黏土	3.8	3.8	17.4	13.3	8.3
2-2b 淤泥质黏土	9.0	9.0	17.1	13.4	8.3
2-2c 淤泥质粉质黏土	3.5		17.7	13.3	8.6
4-1b 淤泥质粉质黏土	17.5		18.0	16.8	10.4
4-2a 黏土	3.5	5.5	18.0	19.5	11.5
5-3a 砂质粉土		19.0	19.6	4.0	28.0
6-3a 黏土	6.5		19.2	27.5	14.3
7-1 粉质黏土	13.7	9.0	19.7	33.6	16.4
8-1 粉砂		12.0	20.9	2.0	34.0
地基加固(基坑底加固)	3.0		20.0	160.0	20.0

图2 不同计算方法不同地层条件时的 K_s -嵌固深度曲线Fig.2 K_s -embedded depth curves for different calculation methods and different strata conditions

减法和文献[5]方法的 K_s 次之,沪规法的 K_s 最小。

算例中,地下二层车站基坑、地下三层车站基坑及地下一层出入口基坑的计算嵌固深度与临界嵌固深度比值分别为 1.0 ~ 1.6、1.3 ~ 1.8 和 1.4 ~ 2.4。

以无地基加固情形下的地层 1 为例,以沪规法嵌固深度为基础,对 3 类基坑的嵌固深度进行优化,

结果如表 3 所示。由表 3 可见: K_s 要求值越大,沪规法算得的嵌固深度就越大,嵌固深度优化空间相应也越大;与文献[5]方法相比,文献[6]方法和强度折减法算得的嵌固深度优化量更大。

结合 2 种地层的参数,进一步分析图 2 可知,软土厚度越小, K_s 就越大, K_s -嵌固深度曲线的斜率也越大。

表3 不同方法计算的无地基加固情形下地层1嵌固深度优化情况

Tab.3 Optimization of stratum 1 embedded depth calculated by different methods without foundation reinforcement

基坑项目	K_s 要求值	沪规法嵌固深度/m	不同方法的嵌固深度优化量/m		
			文献[5]方法	文献[6]方法	强度折减法
地下二层车站基坑	1.9	23.6	1.0	2.3	5.4
地下二层车站基坑	2.2	27.3	1.5	4.5	4.5
地下三层车站基坑	1.9	25.2	2.8	4.7	6.7
地下三层车站基坑	2.2	30.8	4.6	8.2	7.8
地下一层出入口基坑	1.7	13.7	2.2	3.3	2.5
地下一层出入口基坑	1.9	16.9	3.2	5.6	2.4

注:不同方法的嵌固深度优化量指采用不同方法计算达到与沪规法相同的 K_s 值时,嵌固深度较沪规法的优化量。

考虑地基加固后,不同计算方法得到的 K_s 较无地基加固情况的 K_s 均有所增大,该增量与嵌固深度关系不大。地下二、三层车站基坑底位于 2-2c 或 4-1b 地层,改进计算方式下的嵌固深度较无地基加固的情况可减小 0.5 ~ 2.0 m;地下一层出入口基坑底位于 2-2b 地层,改进方法下的嵌固深度可减小 2.5 ~ 7.0 m。可见,坑底土体抗剪强度指标越低,地基加固对 K_s 的贡献量越大。

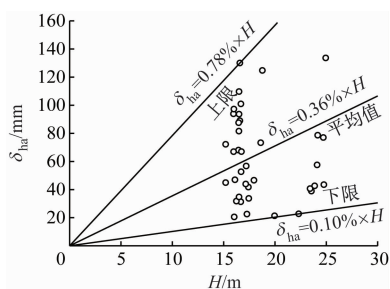
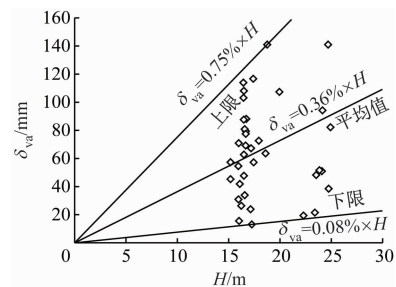
2 地铁窄基坑变形与 K_s 的关系

大量研究表明,基坑变形和 K_s 之间存在关联性。对此,本文基于 38 个采用地下连续墙的宁波地铁窄基坑工程信息构建案例数据库,进而结合 K_s 分析地铁窄基坑变形规律。

2.1 基坑变形性状

2.1.1 开挖深度对基坑变形的影响

根据案例数据库中各项目的围护墙侧移平均值 δ_{ha} 、坑外地面沉降平均值 δ_{va} 及开挖深度 H ,绘制 δ_{ha} - H 分布及拟合曲线如图 3 所示, δ_{va} - H 分布及拟合曲线如图 4 所示。结合图 3、图 4 及相关数据可知:地下二层车站基坑及地下三层车站基坑的 H 分布较为集中,基坑宽度 W 也比较接近, δ_{ha} 及 δ_{va} 的离

图3 δ_{ha} - H 分布及拟合曲线Fig.3 δ_{ha} - H distribution and fitting curves图4 δ_{va} - H 分布及拟合曲线Fig.4 δ_{va} - H distribution and fitting curves

散范围都较大; δ_{ha} 与 H 的比值在 0.10% ~ 0.78% 之间,平均比值为 0.36%; δ_{va} 与 H 的比值在 0.08% ~ 0.75% 之间,平均比值为 0.36%。经分析,基坑几何尺寸不是基坑变形的唯一影响因素,基坑变形还与地质条件、支护体系参数、施工条件等要素相关。因此设计施工需重视这些要素。

2.1.2 坑外地面平均沉降与围护墙平均侧移的关系

经量纲一化处理后, δ_{va}/H 与 δ_{ha}/H 的关系见图 5。由图 5 可知,各项目 δ_{va} 与 δ_{ha} 的比值在 0.38 ~ 5.04 之间,平均比值为 1.17。这表明宁波地区地铁窄基坑地面平均沉降略大于围护墙平均侧移。

2.2 基坑变形与 K_s 的关系

文献[12]结合奥斯陆及旧金山等地的工程案例,提出了 δ_{ha} 和 K_s 之间的上下限关系。基于不同方法算得的 K_s ,结合案例数据库的实测数据绘制 δ_{ha} - K_s 分布及文献[12]界限曲线如图 6 所示。按该界限曲线,当 K_s 小于 1.5 时, K_s 的提高可有效减小围护墙侧移,而当 K_s 大于 1.5 时,围护墙侧移界限趋于稳定。

由图 6 可见,当采用沪规法计算 K_s 时,围护墙侧移实测数据基本位于该上下限曲线内;围护墙实

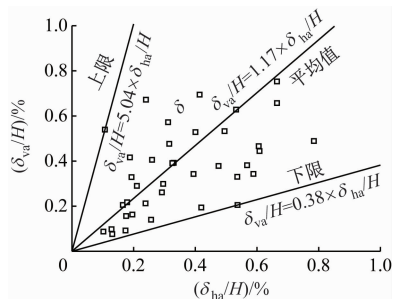
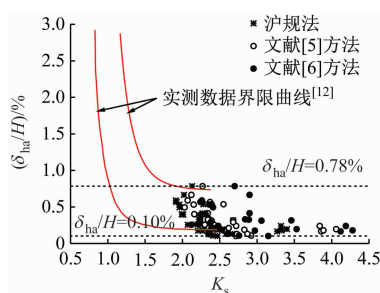


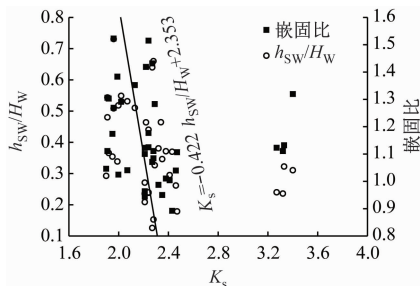
图5 坑外地面平均沉降与围护墙平均侧移的关系

Fig. 5 Relationship between average land subsidence outside the pit and average lateral displacement of retaining wall

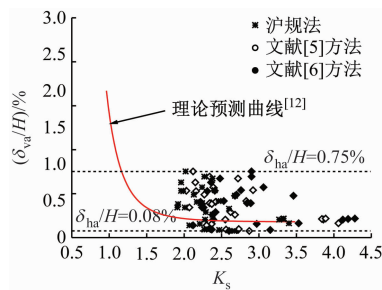
图6 δ_{ha} - K_s 分布及文献[12]界限曲线Fig. 6 δ_{ha} - K_s distribution curve and reference [12] boundary curve

测侧移的离散程度随 K_s 的增大而减小,即上限曲线有逼近下限曲线的趋势。

墙底以上软土比例 h_{sw}/H_w 、嵌固比与 K_s (沪规法算得) 的关系如图7所示。由图7可知,案例数据库中 K_s 随墙底以上软土比例的增幅有减小的趋势,而 K_s 随嵌固比增大而增大的趋势不明显。这表明本文案例数据库中 K_s 较大的情况多对应于地质条件较好且嵌固比不大的情况 ($K_s > 3.0$ 是由于土层参数较高),说明较好的地质条件更有利于控制围护墙侧移,这与文献[13]的研究结论一致。

图7 墙底以上软土比例、嵌固比与 K_s (沪规法算得) 的关系Fig. 7 Relationship between the proportion of soft soil above the wall bottom, the embedded ratio and K_s (calculated by Shanghai Code)

文献[12]基于有限元分析也得出了坑外地面沉降的预测曲线。根据该曲线,当 K_s 大于1.5左右时,地面沉降也将趋于稳定。当采用沪规法计算 K_s 时,案例数据库中的地面沉降实测数据大致符合该规律(见图8)。经分析,由于该理论预测曲线未考虑基坑尺寸、地质条件及支护体系参数等要素影响,故图8中数据离散性较大,须进行相应的修正。和图6类似,随着 K_s 的增大,地面沉降数据有收敛的趋势。

图8 坑外地面平均沉降与 K_s 的关系Fig. 8 Relationship between average land subsidence outside the pit and K_s

当采用改进方法计算 K_s 时,与沪规法计算结果相比,文献[5]方法算得的 K_s 增大值为0~0.66,平均增大0.27,文献[6]方法算得的 K_s 增大值为0~1.97,平均增大0.47。进一步分析图8可知:采用改进方法得到的散点仍位于围护墙平均侧移界限曲线和坑外地面平均沉降理论预测曲线的平滑段内。和沪规法的计算结果类似,基坑变形实测数据的离散性随 K_s 的增大而减小。

3 地铁深基坑变形与 W 的关系

宁波地铁窄基坑案例项目中的 W 较接近,而实际工程中不同项目的 W 可能存在较大差异。对此,有必要分析 W 对基坑变形的影响。

3.1 有限元分析

以地层1为例,利用有限元软件分别建立不同 W 、不同嵌固深度的地下二层车站基坑 ($H = 17$ m) 有限元模型。其中,土体采用 HSS (小应变土体硬化本构) 模型,坑外荷载取值为20 kPa,其余参数根据工程经验取值。

经有限元模型仿真计算,嵌固深度为19 m时地下二层车站基坑的位移云图如图9所示。由图9可知,相较于宽基坑,窄基坑开挖引起的土体侧移及沉降范围更小,围护墙稳定性更高,对周边环境的

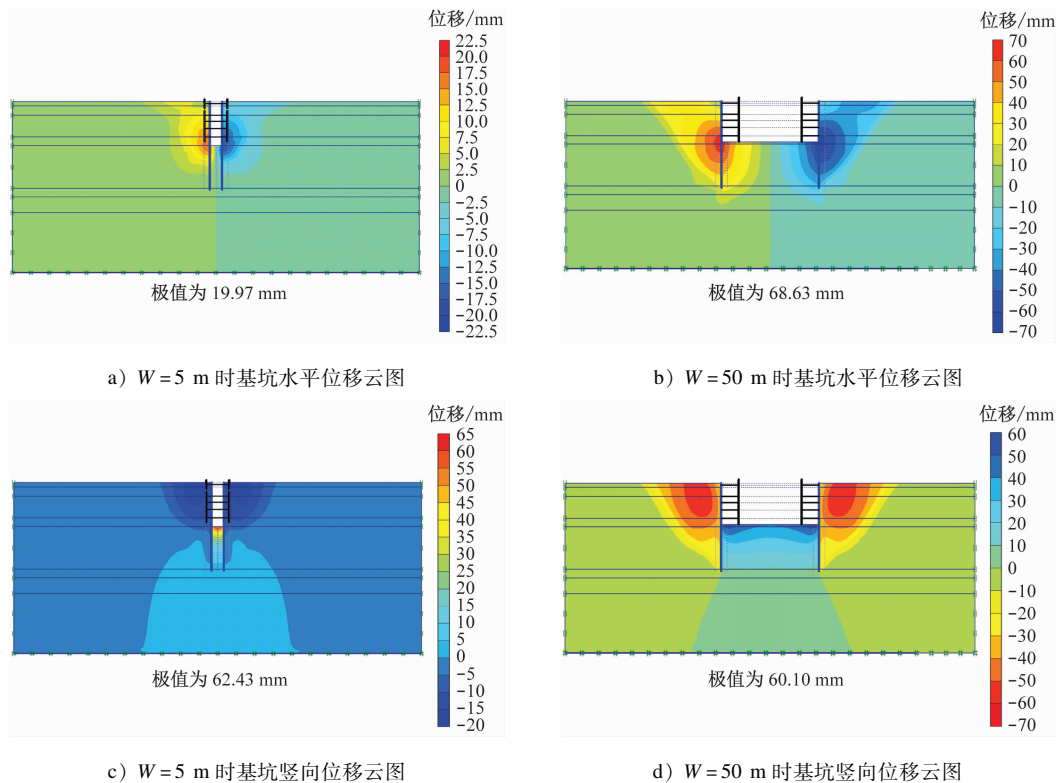


图9 不同宽度的地下二层车站基坑位移云图(基坑开挖深度为17 m,嵌固深度为19 m)

Fig. 9 Displacement nephogram of two-story underground station foundation pits with different width (when pit excavation depth = 17 m, embedded depth = 19 m)

影响也更小。

不同 W 下,基坑的土体最大水平位移及最大沉降同嵌固深度的关系如图 10 及图 11 所示。由图 10 及图 11 可知,最大土体水平位移及最大沉降均随 W 的减小而减小;但随着嵌固深度的增加,土体变形减小不明显。当 W 较大时,因土体位移场范围较大,最大水平位移及最大沉降随嵌固深度增加有所减小。可见,采用改进方法适当优化围护墙嵌固深度对土体变形的影响不大。

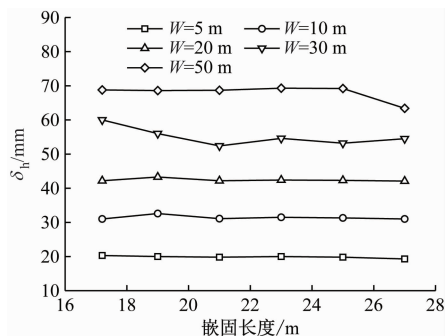


图 10 最大水平位移与嵌固深度的关系 ($H = 17$ m)

Fig. 10 Relationship between maximum horizontal displacement and embedded depth ($H = 17$ m)

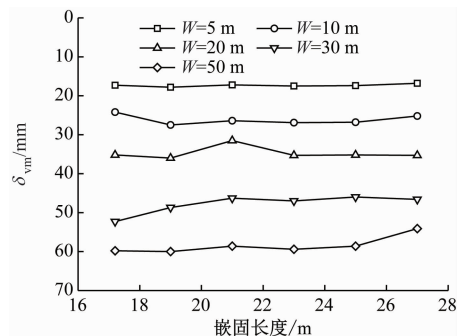


图 11 最大沉降与嵌固深度的关系 ($H = 17$ m)

Fig. 11 Relationship between maximum subsidence and embedded depth ($H = 17$ m)

3.2 工程实例分析

本文对宁波轨道交通 4 号线白鹤站(以下简称“白鹤站”)进行工程实例分析。白鹤站基坑测点平面布置见图 12。白鹤站东、西侧标准段 W 分别为 19.7 m、5.8 m,基坑挖深分别为 16.8 m、18.0 m,均采用 800 mm 厚的地下连续墙,墙深分别为 36.0 m、35.0 m;竖向均设置 1 道混凝土支撑及 4 道钢支撑。基坑开挖范围内以淤泥质黏土、黏土及粉质黏土为主。

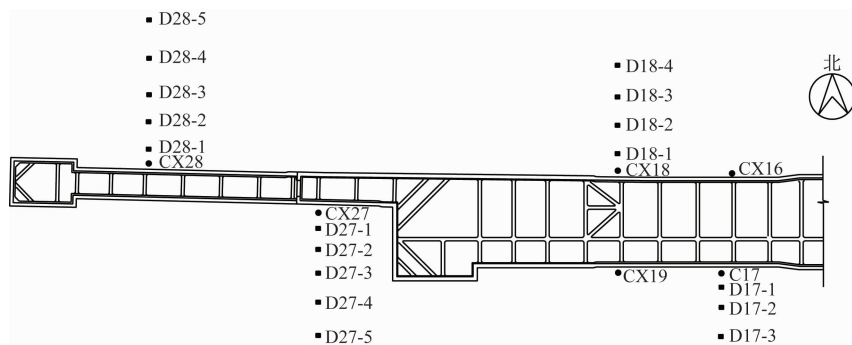


图12 白鹤站基坑测点平面布置图

Fig. 12 Plan layout of Baihe Station foundation pit monitoring points

当采用沪规法计算时,东、西侧标准段的 K_s 分别为 2.33、2.1;当采用文献[6]方法计算时,东、西侧标准段的 K_s 分别为 2.45 和 5.89。可见,较窄基坑的抗隆起安全稳定性更高。

根据工程实测数据,白鹤站地下连续墙水平位移及坑外地面沉降值见图13和图14。

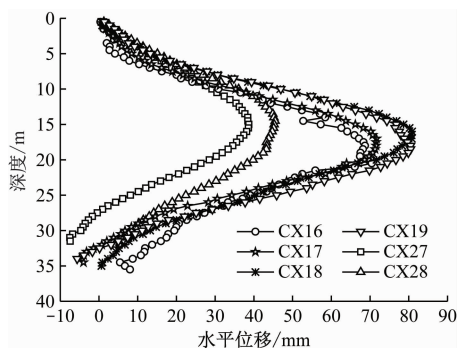


图13 白鹤站地下连续墙水平位移

Fig. 13 Horizontal displacement of diaphragm wall at Baihe Station

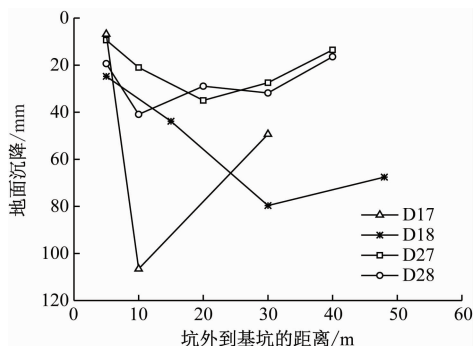


图14 白鹤站坑外地面沉降

Fig. 14 Land subsidence outside of pit at Baihe Station

由图13及图14可知, $W=5.8\text{ m}$ 段的地下连续墙最大水平位移仅为 $W=19.7\text{ m}$ 段地下连续墙最大水平位移的40%~60%; $W=5.8\text{ m}$ 段的地面最大沉降仅为 $W=19.7\text{ m}$ 段地面最大沉降的35%~

50%,且 $W=5.8\text{ m}$ 段的基坑影响范围明显更小。该结果进一步验证了窄基坑的围护墙底水平位移更小,坑外土体沉降的范围也更小。

4 结语

本文研究探讨了宁波地区3类典型地铁窄基坑的坑底抗隆起稳定性,并系统性地分析了基坑变形与 K_s 之间的关系,以及 W 对基坑变形的影响,得到如下结论:

1) K_s 随嵌固深度的变化曲线呈多线段形式,转折点位于软硬土层分界处。嵌固深度与临界嵌固深度比值越大,坑底抗隆起稳定性越好,嵌固深度优化空间越大。

2) 坑底土体抗剪强度指标越低,考虑地基加固后,嵌固深度优化空间越大。

3) 即使基坑几何形态接近,围护墙平均侧移和坑外地面平均沉降的离散范围仍较大,因而需重视地铁窄基坑的支护体系设计及施工质量等。

4) 宁波地铁车站深基坑的围护墙平均侧移、坑外地面平均沉降与 K_s 的关系总体符合其他文献提出的预测规律。随着 K_s 增大,基坑变形散点上限有逼近下限的趋势,这主要和工程地质条件有关。

5) 就较宽基坑而言,窄基坑的围护墙稳定性更高,变形对环境的影响更小。土体变形随 W 的减小而减小,嵌固深度对变形的影响不大。

参考文献

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑基坑支护技术规程: JGJ 120—2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical specification for retaining and protection of building foundation excavations: JGJ 120—2012[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012.

- [2] 上海市住房和城乡建设管理委员会. 基坑工程技术标准: DG/TJ 08—61—2018 [S]. 上海: 同济大学出版社, 2018.
Shanghai Municipal Commission of Housing and Urban Rural Development Management. Technical code for excavation engineering: DG/TJ 08—61—2018 [S]. Shanghai: Tongji University Press, 2018.
- [3] 王洪新. 基坑的尺寸效应及考虑开挖宽度的抗隆起稳定安全系数计算方法[J]. 岩土力学, 2016, 37(增刊2): 433.
WANG Hongxin. Size effect of foundation pit and calculation method of anti-uplift stability safety factor considering excavation width[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(S2): 433.
- [4] 夏霄. 基坑工程稳定与变形分析的若干问题研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2015.
XIA Xiao. Research on some problems of stability and deformation analysis of foundation pit engineering[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015.
- [5] 刘杨镔, 夏才初, 徐晨, 等. 窄基坑围护墙插入深度优化解析及离心试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(3): 593.
LIU Yangbin, XIA Caichu, XU Chen, et al. Analytical solution and centrifugal test for the optimization of retaining wall insertion depth in narrow foundation pits[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(3): 593.
- [6] 阳吉宝, 黄星. 窄基坑隆起破坏模式及抗隆起稳定性验算研究[J]. 建筑结构, 2021, 51(增刊2): 1495.
YANG Jibao, HUANG Xing. Study on uplift failure mode and antiuplift stability checking calculation of narrow foundation pit[J]. Building Structure, 2021, 51(S2): 1495.
- [7] 徐莞蕾. 基坑宽度对围护结构及周边土体性状的影响分析[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
XU Yuanlei. Analysis of the influence of foundation pit width on the characteristics of retaining structure and surrounding soil[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014.
- [8] 胡敏云, 苟长飞, 严显翔, 等. 基坑宽度效应对基坑稳定性影响的有限元分析[J]. 地基处理, 2020, 2(1): 1.
HU Minyun, GOU Changfei, YAN Yuxiang, et al. Finite element analysis of the effect of foundation pit width on its stability [J]. Chinese Journal of Ground Improvement, 2020, 2(1): 1.
- [9] 马元, 刘亚竞, 侯永茂, 等. 杭州狭长软土基坑支护侧移规律与解析预测方法研究[J]. 隧道建设(中英文), 2019, 39(11): 1797.
MA Yuan, LIU Yajing, HOU Yongmao, et al. Support wall lateral deflection rule and prediction of deep narrow foundation in Hangzhou soft clay [J]. Tunnel Construction, 2019, 39(11): 1797.
- [10] 郑刚, 俞丹瑶, 程雪松, 等. 考虑土体强度不均匀性时宽窄基坑坑底隆起稳定研究[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(增刊1): 1.
ZHENG Gang, YU Danyao, CHENG Xuesong, et al. Basal heave stability of wide and narrow excavations considering non-homogeneous features of soft clay [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(S1): 1.
- [11] 李林, 黄奕鹏, 苏宁川. 狭窄基坑抗隆起稳定性计算方法的改进研究[J]. 地下空间与工程学报, 2022, 18(增刊1): 74.
LI Lin, HUANG Yipeng, SU Ningchuan. Study on improvement of calculation method for uplift stability of narrow foundation pit [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2022, 18(S1): 74.
- [12] MANA A I, CLOUGH G W. Prediction of movements for braced cuts in clay[J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, 1981, 107(6): 759.
- [13] 臧延伟. 软土层厚度和基坑宽度对地铁车站基坑变形的影响[J]. 城市轨道交通研究, 2022, 25(9): 105.
ZANG Yanwei. Influence of soft soil layer thickness and foundation pit width on metro station foundation pit deformation[J]. Urban Mass Transit, 2022, 25(9): 105.
- 收稿日期:2023-03-01 修回日期:2023-07-11 出版日期:2025-04-10
Received:2023-03-01 Revised:2023-07-11 Published:2025-04-10
• 第一作者:姚任行, 正高级工程师, 102183997@qq.com
通信作者:邱豪磊, 工程师, qiuhl223@163.com
• ©《城市轨道交通研究》杂志社, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

(上接第 208 页)

- XIE Yi, KOU Junyu, YU Haowei, et al. Analysis of the influence of suspension parameters on lateral stability of suspended monorail vehicle [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2019, 36(12): 35.
- [21] HE Q, CAI C, ZHU S, et al. Key parameter selection of suspended monorail system based on vehicle - bridge dynamical interaction analysis [J]. Vehicle System Dynamics, 2020, 58(3): 339.
- [22] BAO Y, ZHAI W, CAI C, et al. Dynamic interaction analysis of suspended monorail vehicle and bridge subject to crosswinds[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2021, 156: 107707.
- [23] JIANG Y, WU P, ZENG J, et al. Researches on the resonance of a new type of suspended monorail vehicle-bridge coupling system based on modal analysis and rigid-flexible coupling dynamics [J]. Vehicle System Dynamics, 2021, 59(1): 135.
- 收稿日期:2023-01-11 修回日期:2023-04-18 出版日期:2025-04-10
Received:2023-01-11 Revised:2023-04-18 Published:2025-04-10
• 通信作者:刘阳明, 高级工程师, 187385980@qq.com
• ©《城市轨道交通研究》杂志社, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license