

胡增辉. 某滨海城市地铁基坑变形及影响因素分析[J]. 华南地震, 2023, 43(2): 174-184. [HU Zenghui. Analysis of Deformation and Influencing Factors of Subway Foundation Pit in a Coastal City[J]. South China journal of seismology, 2023, 43(2): 174-184]

## 某滨海城市地铁基坑变形及影响因素分析

胡增辉

(宁波轨道交通集团有限公司, 浙江 宁波 315000)

**摘要:** 依托某滨海城市轨道交通一、二期建设工程全部113个车站基坑, 以测斜及地表沉降两个关键指标表征基坑变形特征, 统计分析实际监测成果, 对基坑变形及影响因素进行了研究。结果表明: 地层条件是影响基坑变形的最关键因素, 当基底和墙趾均处于不稳定土层时基坑变形最大, 当基底处于不稳定土层、墙趾处于稳定土层时变形次之; 设计因素对于基坑变形具有重要影响, 大厚度、加强配筋地墙对基坑的变形控制明显优于小厚度、未加强配筋地墙, 抽条加固对基坑变形的控制效果较抽条+裙边、网格加固等形式差; 在相关规范基础上, 通过工程实践形成了该滨海城市轨道交通工程基坑变形综合动态预警方法, 避免了仅依赖单一指标导致的频繁预警及可靠性等问题, 有效减少了预警次数、避免了不必要的资源浪费, 但需要正确判断基坑风险状态, 对相关人员的工程经验要求较高。

**关键词:** 软土基坑; 变形因素; 统计分析; 综合动态预警

中图分类号: U455.4

文献标识码: A

文章编号: 1001-8662(2023)02-0174-11

DOI: 10.13512/j.hndz.2023.02.20

## Analysis of Deformation and Influencing Factors of Subway Foundation Pit in a Coastal City

HU Zenghui

(Ningbo Rail Transit Group Co., Ltd., Ningbo 315000, China)

**Abstract:** Based on all 113 station foundation pits of the first and second phase construction projects of a coastal urban rail transit, the deformation characteristics of foundation pits were characterized by two key indicators of inclination measurement and surface settlement. The actual monitoring results were statistically analysed, and the deformation and influencing factors of foundation pits was analysed. The results show that the stratum condition is the most critical factor affecting the deformation of foundation pit. The deformation is the largest when both the base and the wall toe are in the unstable soil layer, and the deformation is the second when the base is in the unstable soil layer and the wall toe is in the stable soil layer. Design factors have an important influence on the foundation pit deformation. The deformation control of the foundation pit by the large-thickness, reinforced diaphragm wall is significantly better than that of the small-thickness, unreinforced diaphragm wall. The control effect of strip reinforcement on the foundation pit deformation is worse than that of strip + skirt, grid reinforcement and other

收稿日期: 2022-10-12

作者简介: 胡增辉(1981-), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为城市轨道交通工程建设管理、地下工程等。

E-mail: 819189292@qq.com

forms. On the basis of relevant specifications, a comprehensive dynamic early warning method for foundation pit deformation of the coastal urban rail transit project is formed through engineering practice, which avoids the problems of frequent early warnings and reliability problems caused by relying only on a single indicator, effectively reduces the number of warnings and avoids unnecessary waste of resources. However, it is necessary to correctly judge the risk status of the foundation pit, which requires high engineering experience of relevant personnel

**Keywords:** Soft soil excavation; Deformation factors; Statistical analysis; Comprehensive dynamic early warning

## 0 引言

国内轨道交通工程处于蓬勃发展时期,多地正大规模开展工程建设工作。2021年3月发布的“十四五”规划提出,新增城市轨道交通运营里程3000 km<sup>[1]</sup>。截止2021年底,全国已有51个城市开通轨道交通运营线路269条,运营里程达8708 km<sup>[2]</sup>,在满足人民群众交通出行、缓解城市交通拥堵、促进经济社会发展方面发挥了重要作用。

近年来,软土基坑变形及影响因素已有一定程度的研究。钟俊辉等<sup>[3]</sup>分析了福州某软土基坑开挖过程中墙体变形特性、软土分布深度和厚度等因素对基坑变形的影响。丁智等<sup>[4]</sup>根据基坑开挖深度等条件的不同对浙江地区软弱土深基坑工程实测数据进行了统一归纳研究,得出了基坑最大侧移量与开挖深度等之间的关系。王占生等<sup>[5]</sup>基于实测资料统计分析了开挖深度、地连墙插入比、开挖阶段等对苏州地铁车站软土基坑变形特性的影响。刘东燕等<sup>[6]</sup>结合深圳某软土深基坑工程实例,模拟基坑开挖过程,对围护结构入土深度、支撑体系刚度、围护结构刚度、锚索预应力等影响基坑变形的因素进行了分析。秦会来等<sup>[7]</sup>探讨了珠海地区深厚淤泥地层条件下基坑的变形特点,系统分析了坑内加固区范围、支护桩嵌固深度、支护桩刚度等因素对基坑变形的影响及影响规律。可见,地层条件、基坑规模、支护结构、基底加固等是软土基坑变形分析和控制的重点关注领域。然而,目前基于工程优化实践对软土基坑变形及影响因素开展对比分析的研究较为少见。

某滨海城市轨道交通建设单位在二期工程实施过程中,从合理性、经济性出发,在确保基坑变形风险整体可控的重要前提下,对一期工程围护结构插入比、配筋率等设计参数进行了优化,并组织实施了不同的基底加固形式,对超出相关规范变形预警阈值的情况积极召开“数据超标分

析会”,针对具体基坑情况“一事一议”进行判断,积极探索基坑设计优化方案,实现了变形控制、重大风险零事故和经济合理的平衡,同时积累了丰富的工程实践经验。

本文依托该滨海城市轨道交通一、二期工程共计113个地铁车站基坑,采用测斜和地表沉降监测数据描述基坑变形特征,分析经过设计优化的二期基坑与一期基坑的变形差异,统计变形与地层因素、设计因素的关系,基于工程实践经验建立适用于该地区的软土基坑变形综合动态预警方法,研究成果可为类似工程提供借鉴。

## 1 基坑工程建设及变形概况

某滨海城市位于典型软土区域,广泛分布的厚层软土具有天然含水量高、孔隙比大、压缩系数高、灵敏度高、透水性低、强度低等特点。

区内基坑工程涉及主要土层包括:②<sub>2a</sub>层淤泥、②<sub>2b</sub>层淤泥质黏土、②<sub>2c</sub>层淤泥质粉质黏土、③<sub>1a</sub>层黏质粉土、③<sub>1b</sub>层粉砂、③<sub>1T</sub>层粉质黏土、④<sub>1a</sub>层淤泥质粉质黏土、⑤<sub>1a</sub>层黏土、⑤<sub>1b</sub>层粉质黏土、⑤<sub>1T</sub>层黏质粉土。根据该滨海城市工程地质勘察成果、工程经验及相关规范,可将土层划分为稳定层和不稳定层,划分标准如表1所示。

该滨海城市轨道交通一、二期建设共包含113个主体车站基坑,支护形式一般采用地下连续墙+内支撑,详细情况见表2。为降低基坑变形及周边环境影响,基底以上至第1道支撑下部土体进行弱加固;基底以下3 m范围内土体进行强加固。

地铁1~5号线车站基坑总体变形情况如图1所示,可见一期2(I)号线基坑变形控制最好,1号线变形较二期各线路变形相近或更小;二期4、5号线最大沉降平均值显著增大。综合比较,二期基坑测斜平均值63.52 mm,为一期的1.32倍;最大测斜平均值106.18 mm,为一期的1.55倍。二期基坑地表沉降平均值-57.56 mm,为一期的1.27

表1 稳定土层划分标准

Table 1 Classification criteria for of stable soil layers

性质	粘性土	砂土、粉土	代表土层
稳定	$a_{1-2} < 0.5 \text{ MPa}^{-1}$ 、 $E_s \geq 4 \text{ MPa}$ 且 $I_L \leq 0.5$	$a_{1-2} < 0.5 \text{ MPa}^{-1}$ 且 $D_r \geq 0.33$	⑤ <sub>1a</sub> 、⑤ <sub>1b</sub>
不稳定	其余	其余	② <sub>2</sub> 、③ <sub>2</sub> 、④ <sub>1</sub>

注： $a_{1-2}$ 压缩系数， $E_s$ 压缩模量， $I_L$ 液性指数， $D_r$ 相对密实度

表2 某滨海城市轨道交通工程基坑建设概况

Table 2 Overview of foundation pit construction of a coastal urban rail transit project

工期		基坑形式		
一期	二期	站层	深度/m	围护结构(标准段)
	2号线(Ⅱ期)	1	8.7~13.3	/
1号线	3号线	2	13.5~21.9	0.8~1.0 m厚地连墙+1道砼支撑、4道钢支撑
2号线(Ⅰ期)	4号线			
	5号线	3	22.2~27.9	1.0 m厚地连墙+2道砼支撑、5道钢支撑

倍；最大地表沉降平均值-138.58 mm，为一期坑的1.34倍。可见，二期基坑变形整体较一期要大。

## 2 基坑变形的基本原理

基坑土方开挖，基坑内部土压力减小，外部土压力保持不变或因堆载等原因增大，使得基坑内外产生压力差。

假设围护结构刚度足够大，自身变形忽略不计，但因坑内土压力小于坑外土压力，围护结构

整体将向坑内发生位移。围护结构位移压缩坑内土体，压缩范围为开挖面至墙趾，压缩范围内除了原有坑内土压力，还有因压缩产生的作用力（以下简称“压缩作用力”）。当支撑轴力、坑内土压力及压缩作用力与坑外土压力平衡时，围护结构不再位移，即基坑不再变形；其中，压缩作用力与土体性质、压缩范围、压缩程度有关，土体越难压缩、压缩范围越大、压缩程度越大时，压缩作用力越大。

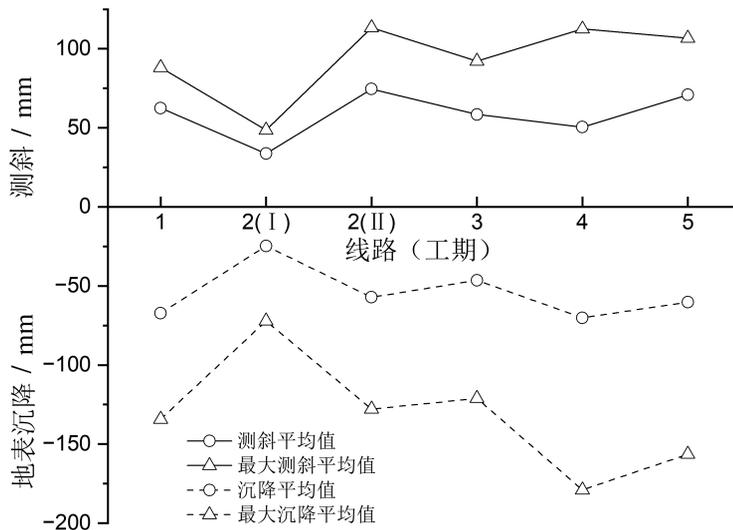


图1 地铁1~5号线车站基坑总体变形

Fig.1 Overall deformation of the station foundation pit of the subway line 1-5

施工过程中土方开挖、坑内土压力减小后,支撑轴力无法立刻补偿,围护结构开始向坑内压缩,压缩作用力逐渐增大,但三者合力仍小于坑外土压力,围护结构继续向坑内位移、坑外土体沉降,直至三者合力与坑外土压力平衡。

实际上,围护结构刚度有限,自身变形不可忽略。当围护结构存在缺陷或其他原因导致刚度偏小时,围护结构局部位置可能因无法抵抗坑外土压力而产生变形、坑外土体沉降,基坑变形。因此,围护结构的整体位移或局部变形均会引起基坑的变形。

### 3 基坑变形的地层因素分析

地层条件是影响基坑变形的主要因素之一,软土等不良地层将加剧基坑变形控制难度<sup>[8-9]</sup>。

#### 3.1 单一土层与基坑变形

考察基坑基底或地下连续墙墙趾所处土层的稳

定性对基坑变形的影响。该滨海城市轨道交通一、二期建设车站基坑开挖面及基底土层大部分处于②<sub>2</sub>层淤泥质土、③<sub>2</sub>层粉质黏土、④<sub>1</sub>层淤泥质粉质黏土;一期23个基坑基底和3个基坑墙趾处于不稳定土层,二期58个基坑基底和30个基坑墙趾处于不稳定土层。

不同基底土层的基坑变形情况如图2所示,可见,基坑变形受基底所在土层影响较为显著,基底处于不稳定土层②、③、④层时,基坑变形较大;处于稳定土层⑤<sub>1</sub>层时,基坑变形可有效控制,平均值在预警阈值以下。

为分析墙趾土层对基坑变形的影响,以基底土层为③<sub>2</sub>、④<sub>1</sub>、④<sub>2</sub>层的17个基坑为例进行统计分析。由图3可知,在开挖面及基底土层大致相似情况下,围护墙趾处于不稳定土层的基坑变形远大于墙趾处于稳定土层的基坑,基坑测斜及周边地表沉降平均值分别高出61%、136%。

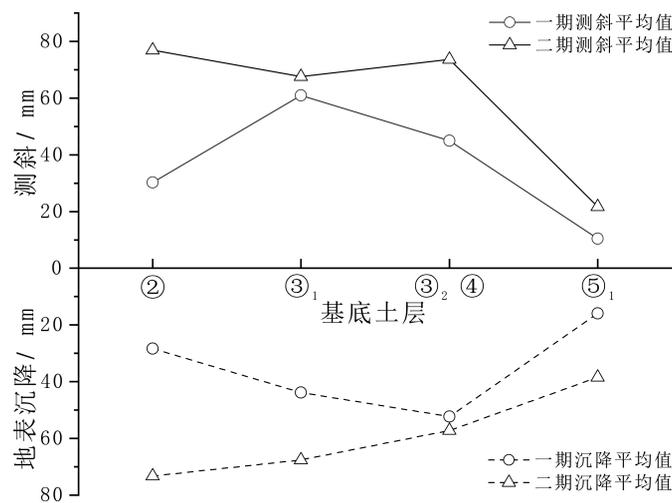


图2 不同基底土层基坑变形

Fig.2 Deformation of foundation pit with different basement soil layers

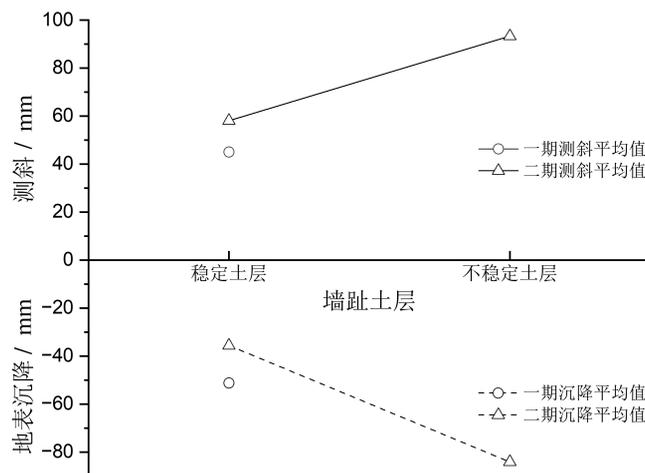


图3 不同墙趾土层基坑变形

Fig.3 Deformation of foundation pit with different wall toe soil layers

相对于不稳定土层，基底或墙趾处于稳定土层时，更容易产生稳定围护结构变形的压缩作用力，即更容易控制基坑的变形。

### 3.2 地层组合与基坑变形

以基坑基底和地下连续墙墙趾所处地层的稳定性不同，组合统计2、3层车站基坑数量。为方便

表达，以S代表稳定、U代表不稳定(见表3)。

以测斜和地表沉降的变形平均值、最大变形平均值和相对深度比表征基坑变形性状。其中，变形平均值为计数工点所有监测点数据的期望，最大变形平均值为计数工点所有监测点累计最大数据的期望，相对深度比为平均值/基坑深度(H)，相关规范要求不超过3%oH。

表3 基底、墙趾地层组合基坑统计

Table 3 Foundation pit statistics on the strata combination of basement and wall toe

2层	3层	墙趾			
		稳定(S)		不稳定(U)	
	稳定(S)	15	9	/	
基底	不稳定(U)	58	17	14	0

注:单元格左下为2层车站基坑统计数,右上为3层车站基坑统计数

不同站层数和基底、墙趾地层组合的基坑变形情况如图4所示，横坐标“2US”含义为基底处于不稳定土层、墙趾处于稳定土层的2层车站基坑，其他以此类推。可见，基坑规模相近，支护体系、加固形式相同，设计原则一致的基坑，基底和墙趾土层稳定性差异对围护结构变形控制影响非常大。2层车站基坑的测斜、沉降变形均随着基底和墙趾的稳定性变差而增大；3层车站基坑变形具有相同的规律，且3SS与2SS的变形、3US与2US的变形较为一致。

在基底、墙趾土层稳定情况一致的前提下，基坑测斜和地表沉降变形的平均值二期是一期的

1.30~1.45倍，最大变形平均值二期是一期的1.45~1.50倍。

一、二期建设的基坑变形相对深度比随地层组合的变化规律如图5所示，其中沉降的相对深度比以负值表现。可见，变形相对深度比的一、二期变化趋势和大小比较一致，测斜和沉降二者基本呈轴对称、亦即测斜和沉降的相对深度比变化趋势和大小比较一致。变形相对深度比随着2层车站基底和墙趾稳定性的变差而增大，3层车站规律相似，但3SS的沉降相对深度比和3US的测斜、沉降相对深度比要小于2SS的情况。

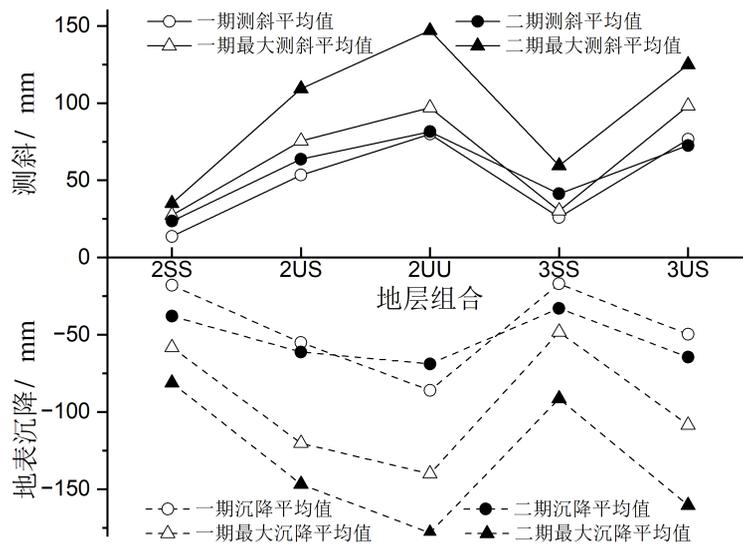


图4 不同站层数和基底、墙趾地层组合的基坑变形

Fig.4 Foundation pit deformation with different station layers and strata combination of basement & wall toe

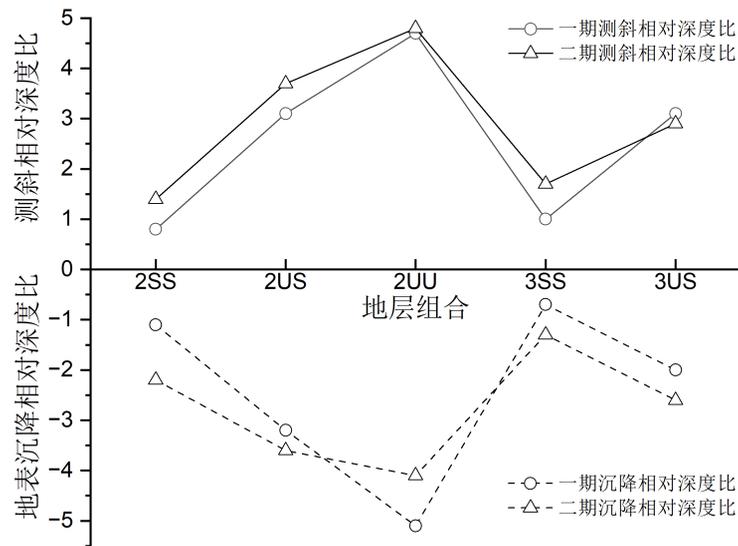


图5 一、二期基坑变形相对深度比

Fig.5 The relative depth ratio of foundation pit deformation in the first and second stage

基底、墙趾均进入稳定土层的基坑，测斜和地表沉降相对基坑开挖深度的比值小于2%*o*H，基坑变形控制满足相关规范要求。

在稳定土层中，土体难以压缩，围护结构产生相对较小的位移，便可以产生足够的压缩作用力，用于与坑内土压力、支撑轴力平衡坑外土压力，即基坑发生较小的变形。

### 4 基坑变形的设计因素分析

基坑设计的科学水平是影响基坑变形的重要因素之一，本节从车站层数、围护插入比、地墙厚度和配筋率、地基加固形式等方面分析设计因

素与基坑变形的关系。

#### 4.1 车站层数与基坑变形

选取该滨海城市轨道交通一、二期工程中61个长140~280 m、宽17~27 m的规模相近的2、3层基坑进行统计分析。其中，一期2层车站基坑19个、3层车站基坑4个，二期2层车站基坑31个、3层车站基坑7个。

由图6、图7可见，二期车站基坑变形明显强于一期车站基坑，其中2层车站尤为明显，测斜及地表沉降变形的平均值分别高出45%、47%。3层测斜平均值与2层相差不大，地表沉降平均值则高出71%。

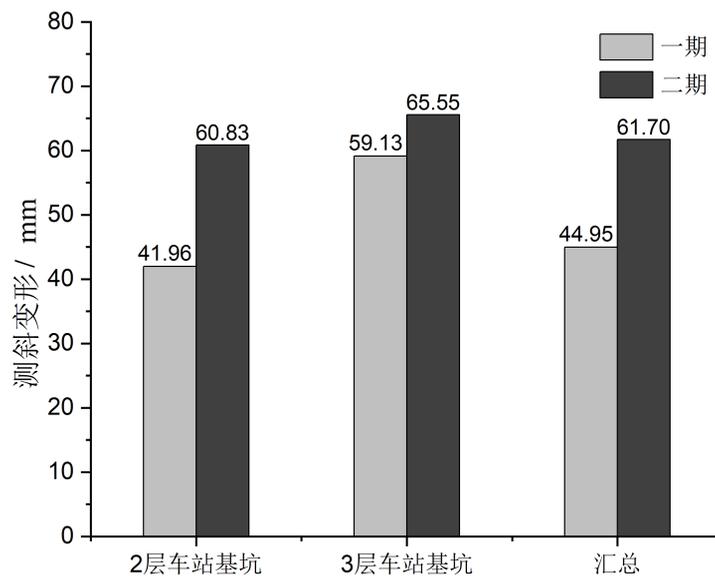


图6 不同站层基坑测斜变形统计

Fig.6 Statistics on horizontal displacement of foundation pit at different station levels

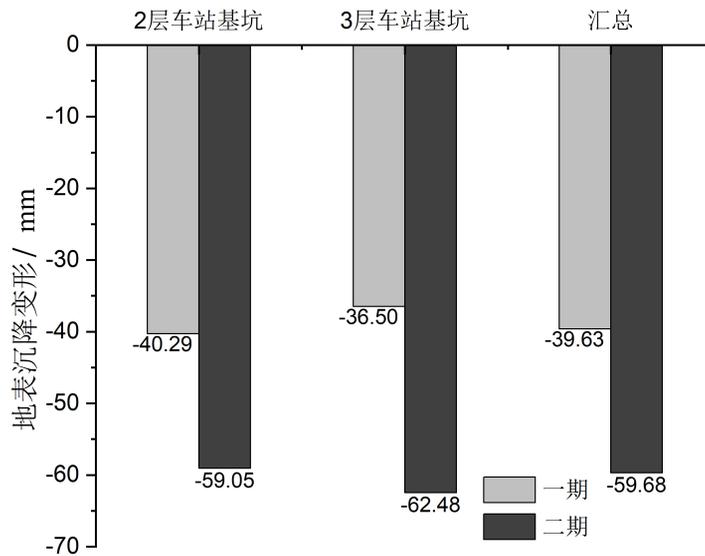


图7 不同站层基坑地表沉降统计

Fig.7 Statistics on surface subsidence of foundation pit at different station levels

车站层数对应基坑深度规模，车站层数少、基坑规模小，坑外最大土压力小，相同条件下，围护结构产生的变形小，因此基坑变形小。

#### 4.2 围护插入比与基坑变形

围护结构插入比的改变亦会影响基坑变形控

制。选取一、二期建设全部基坑，对围护结构插入比平均值进行统计分析。

由表4可知，二期建设阶段设计方对基坑围护结构插入比进行了调整，导致围护墙趾处于不稳定土层的情况明显增加，是造成二期车站基坑变形较一期明显增大的原因之一。

表4 一、二期建设基坑围护结构插入比统计

Table 4 Statistics on insertion ratio of foundation pit enclosure structure in in the first and second phases of construction

工期	墙趾土层	占比/(%)	插入比平均值
一期	稳定土层	91.30	1.00
	不稳定土层	8.70	1.13
二期	稳定土层	57.89	1.08
	不稳定土层	42.11	1.07

插入比即为基坑底面以下围护结构深度与基坑深度的比值。当基坑深度相同时，插入比越大，压缩范围也越大，便可以产生足够大的压缩作用力，使得围护结构产生较小的位移，即插入比越大，基坑变形越小。

#### 4.3 地墙厚度、配筋率与基坑变形

该滨海城市轨道交通工程车站基坑围护结构一般采用800 mm厚地下连续墙，少量基坑同时采用800 mm、1000 mm厚地下连续墙。选取部分相同基底土层、不同地墙厚度的基坑进行对比分析，

如图8、图9所示。

一般情况下，不论基底是否处于稳定土层，通过增加地下连续墙厚度、提高围护结构刚度可以有效控制基坑变形。

此外，地墙刚度还与配筋率有关。该滨海城市轨道交通二期工程在地墙厚度方面未作显著调整，但在配筋率方面较一期有明显的优化。二期工程通过增大纵向拉、压钢筋的配筋率，提高地下连续墙刚度。选取三组基坑规模、开挖深度近似的一、二期建设基坑进行对比分析。对比组1，二期工程受压钢筋提高33%、受拉钢筋不变；对比

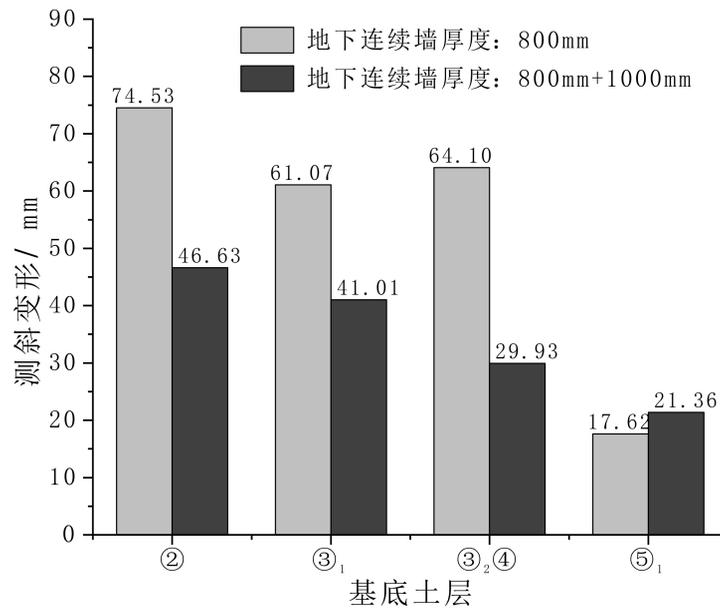


图8 不同地墙厚度测斜变形统计

Fig.8 Statistics on horizontal displacement of diaphragm walls with different thickness

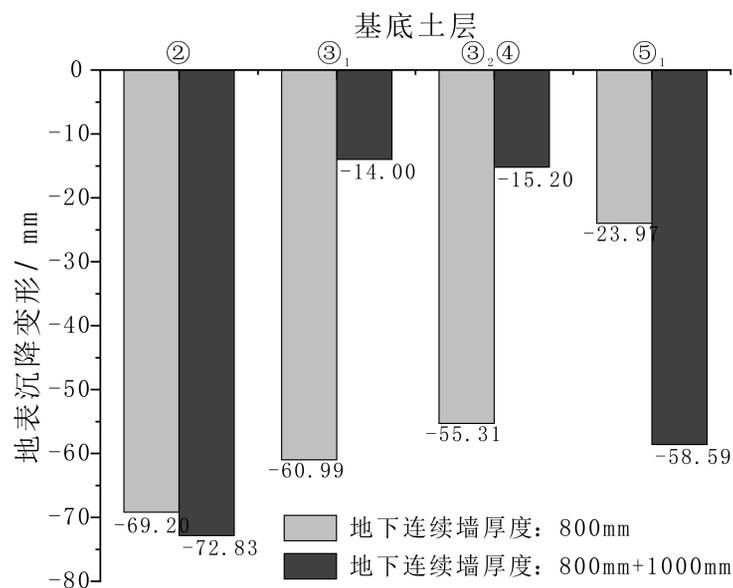


图9 不同地墙厚度地表沉降统计

Fig.9 Statistics on surface subsidence with different diaphragm wall thickness

组2,二期工程受压、受拉钢筋均提高33%;对比组3,二期工程受压、受拉钢筋均提高50%。由图10、图11可知,二期地墙基坑测斜变形控制明显优于一期地墙基坑,地表沉降变形同样有所改善。

地墙刚度提升,有利于抵抗坑外土压力引起的变形。增加厚度,可以提高地墙整体的刚度;提高配筋率,可以增加地墙局部的刚度。根据以往施工经验,最大侧向变形位置往往位于基底或基底以下一定深度,因此提高加强筋区域占比,可针对性地提高地墙的局部刚度,进而有效控制基坑变形。

#### 4.4 地基加固形式与基坑变形

基底地基加固对控制基坑变形具有重要作用,该滨海城市轨道交通工程一般采用高压旋喷桩或三轴搅拌桩强加固,加固形式有抽条加固、抽条+裙边加固、网格加固、满堂加固等。其中,一期工程采用抽条+裙边或网格加固的车站基坑占比36%,二期工程采用抽条+裙边加固的车站基坑占比仅12%。选取一期、二期建设中的38个标准主体车站基坑进行对比分析,其中抽条加固基坑27个,抽条+裙边加固基坑7个,网格加固基坑4个。

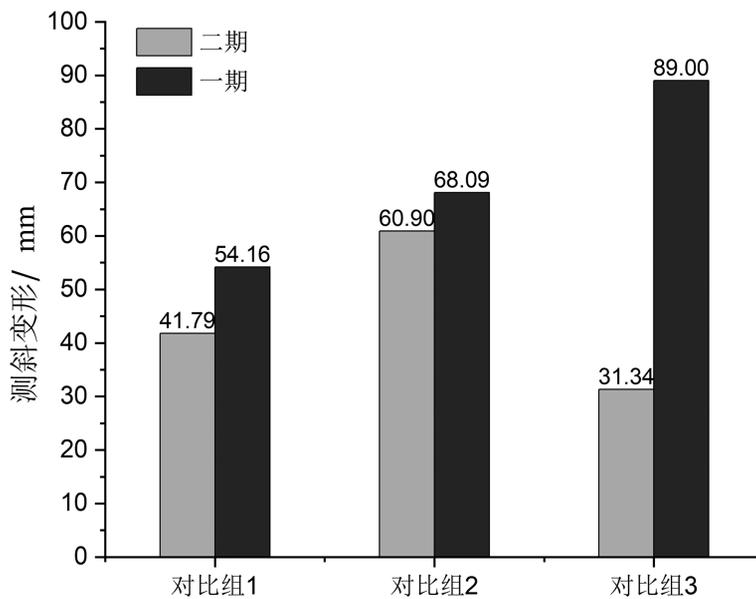


图10 不同地墙配筋率测斜变形统计

Fig.10 Statistics on horizontal displacement of diaphragm walls with different reinforcement ratios

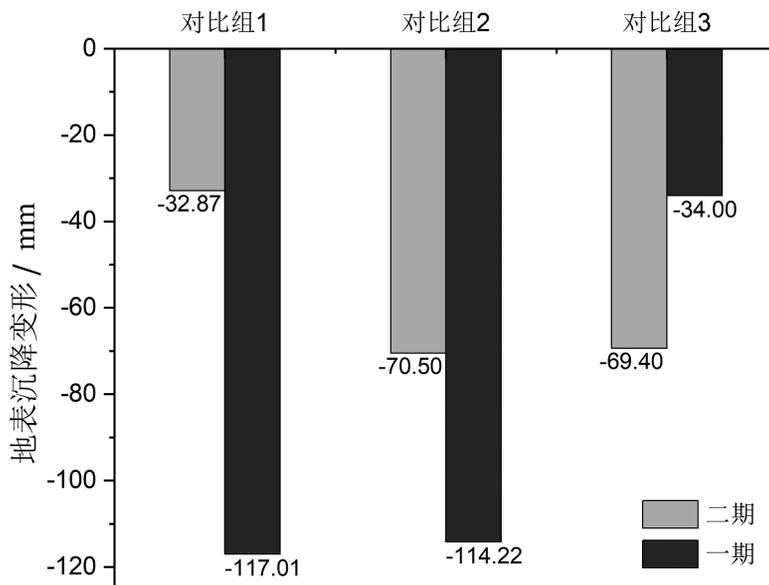


图11 不同地墙配筋率地表沉降统计

Fig.11 Statistics on surface subsidence with different reinforcement ratios of diaphragm walls

由图12、图13可见,抽条+裙边、网格加固形式对基坑变形的控制效果优于抽条加固形式,更易于约束基坑变形。二期工程基坑土层条件较一期差,但二期工程仅对部分车站端头井和重要保护区段采取了裙边加固,这也是二期基坑变形整体较一期大的原因之一。

地基加固是通过人为手段改变土层的力学性质,有目的地提高土层的稳定性,增加土层对围护结构的压缩作用力,进而减小基坑变形。

## 5 基坑变形的综合动态预警

传统监测预警通常是基于单一指标并结合相关规范控制值进行的,此类预警依赖某指标最大值,易出现频繁预警问题且无法保证可靠性。该滨海城市轨道交通工程主体车站基坑的变形预警是在《城市轨道交通工程监测技术规范》(以下简称《规范》)(GB50911-2013)的基础之上,从工程实践出发,以监测数据和风险事件程度为判别标准,

建立的远超《规范》预警阈值的、可靠的基坑变形综合动态方法。在保证基坑整体风险安全可控的前提下，给予基坑更大的变形空间，有效减少基坑变形预警次数，节约建设资源和工期。

### 5.1 综合动态预警模式

基坑变形综合动态预警主要由监测监控管理中心基于定量的监测数据指标和定性的风险事件程度启动综合预警并发出相关信息。监测数据指标即结合现场监测数据、巡视信息和风险情况，通过复核查实、综合分析和专家咨询等方法，及时判定工程风险水平；风险事件程度即根据突发

风险事件可能造成的社会影响、危害程度、紧急程度、发展势态和可控性等情况，确定相应预警等级：蓝色、黄色、橙色和红色预警。

根据监测监控管理中心的相关要求，预警启动后由监理单位组织预警分析会议。针对不同预警等级，各单位需按要求派人员参加会议。

在综合预警情况下，以蓝色、黄色预警为主，现场参会人员主要为监测监控现场分中心人员、建设分公司监测监控模块工程师、设计技术部工程师、业主代表；个别变形控制不力的基坑将发布橙色预警，安全质量部、设计技术部、现场管理部门负责人需参会；红色预警时，各单位或各部门分管领导或负责人需参会。

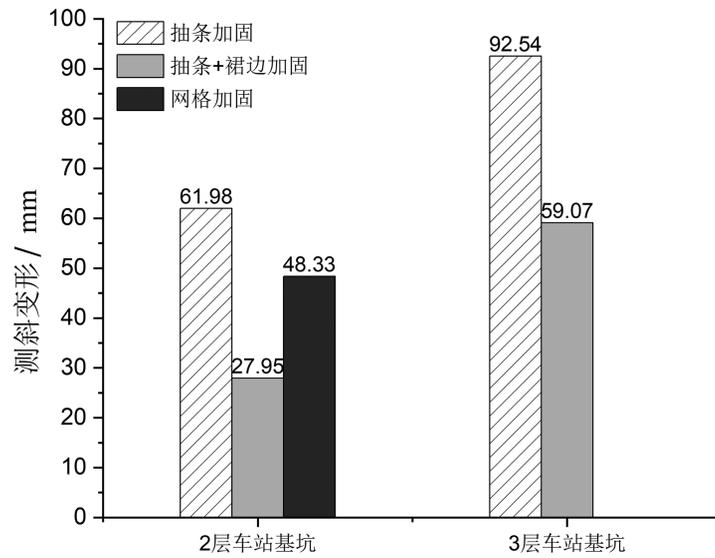


图 12 不同加固方式测斜变形统计

Fig.12 Statistics on horizontal displacement of foundation pit with different reinforcement forms

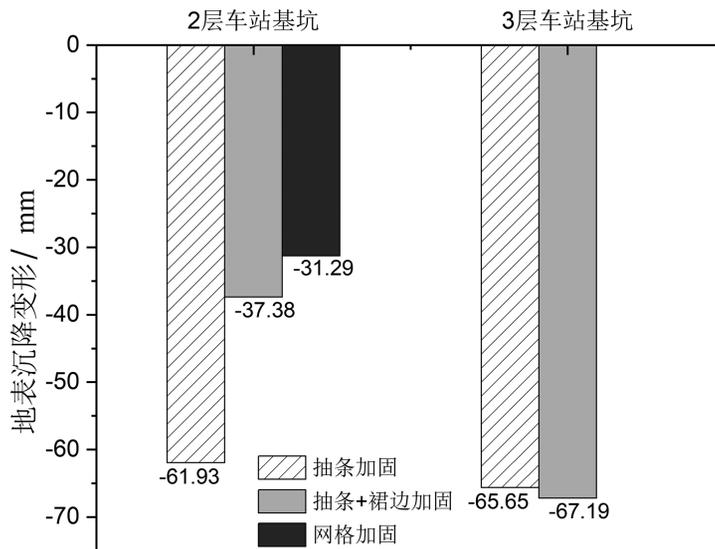


图 13 不同加固方式地表沉降统计

Fig.13 Statistics of surface subsidence with different reinforcement forms

## 5.2 综合动态预警成效

传统预警依托监测数据,监测效果取决于监测频率和完整率,当二者因现场施工限制等情况无法满足要求时,监测数据难以有效反应实际情况,而综合动态预警方法能够在最大程度上避免该问题,满足工作要求,有效控制预警次数、会

议次数,节约建设资源和工期。

以2层车站基坑为例,根据现场实际预警情况,对基坑开挖过程中的预警次数进行标准化(单位长度200 m)换算,结果如表5所示,基坑类别为基底、墙趾所处土层的稳定状况组合,含义同图4横坐标轴。

表5 不同预警体系预警次数换算

Table 5 Conversion of the early warning times by different early warning systems

基坑类别	综合动态预警次数/《规范》预警次数			
	蓝色预警	黄色预警	橙色预警	红色预警
2SS	/	/	/	/
2US	2/0	1/12	2/48	0/5
2UU	3/0	2/15	4/45	0/30

由表5可知,综合动态预警次数远小于《规范》预警次数。基底、墙趾均处于稳定土层(SS)的基坑变形较为稳定,能够满足综合动态预警和《规范》预警控制值。基底处于不稳定土层、墙趾处于稳定土层(US)的基坑变形基本能够满足综合动态预警控制值,但在《规范》预警阈值下,开挖第三层土方起便会出现大量预警,并且以橙色预警为主。基底、墙趾均处于不稳定土层(UU)的基坑变形在综合动态预警控制值下,开挖第三层土方以后会出现蓝色预警,基坑收底期间部分存在橙色预警,但整体预警次数仍然可控;在《规范》预警阈值下,开挖第二层土方起基坑长时间处于预警状态,且以橙色、红色预警为主。

## 6 结论

本文以某滨海城市轨道交通一、二期工程1~5号线全部113个车站基坑为研究对象,主要基于统计方法分析了地层条件、设计因素与基坑变形的关系,得到以下有益结论:

(1)二期建设的测斜及地表沉降大于一期建设,关键影响因素为地层条件。基坑规模相近,支护体系、加固形式相同,设计原则一致的基坑,基底和墙趾土层稳定性差异对围护结构变形控制影响极大。当基底、墙趾均位于稳定土层,围护结构变形控制效果较好;当基底处于不稳定土层、墙趾处于稳定土层,变形控制效果一般;当基底、墙趾均位于不稳定土层,变形控制效果较差。

(2)设计因素对基坑变形有重要影响。其中应考虑地下连续墙刚度及地基加固形式。地下连续墙刚度取决于墙体厚度及配筋率,大厚度、

加强配筋地墙对基坑变形控制明显优于小厚度、未加强配筋地墙。基底地基加固对控制基坑变形具有重要作用,抽条加固形式的控制效果较抽条+裙边、网格加固等形式差。

(3)在该滨海城市轨道交通工程基坑变形综合动态预警控制值下,预警次数整体可控,能够满足工作要求;但综合动态预警阈值远大于相关规范指标,需要有效判断风险状态,对相关人员的工程经验要求较高。

## 参考文献

- [1] 中华人民共和国中央人民政府网站. 中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要[R/OL]. (2021-03-13)[2022-08-10]. [http://www.gov.cn/xinwen/2021-03/13/content\\_5592681.htm](http://www.gov.cn/xinwen/2021-03/13/content_5592681.htm).
- [2] 中国交通新闻网. 城市轨道交通运营里程达8708公里[EB/OL]. (2022-01-07)[2022-08-10]. [https://www.zgjt.com/2022-01/07/content\\_303088.html](https://www.zgjt.com/2022-01/07/content_303088.html)
- [3] 钟俊辉,尹培林,滕超,等. 福州软土地区地铁车站基坑墙体变形特性分析[J]. 地下空间与工程学报,2018,14(S2):821-827.
- [4] 丁智,王达,王金艳,等. 浙江地区软弱土深基坑变形特点及预测分析[J]. 岩土力学,2015,36(S1):506-512.
- [5] 王占生,张佳莉,杜江涛. 地铁车站基坑变形规律分析——以苏州地区为例[J]. 土工基础,2021,35(1):1-5.
- [6] 刘东燕,邓尧,黄伟,等. 含深厚海相软土层基坑开挖变形影响因素分析[J]. 科学技术与工程,2017,17(17):318-324.
- [7] 秦会来,黄俊,李奇志,等. 深厚淤泥地层深基坑变形影响因素分析[J]. 岩土工程学报,2021,43(S2):23-26.
- [8] 宋顺龙. 宁波轨道交通车站基坑变形特征统计分析[J]. 都市快轨交通,2017,30(04):71-75+85.
- [9] 喻军,龚晓南,李元海. 基于海量数据的深基坑本体变形特征研究[J]. 岩土工程学报,2014,36(S2):319-324.