

# Research on the Deformation and Force Characteristics of the Foundation Pit of Open-Cut Method Station with Consideration of Prestressed Support

Qihong Kan

Shanghai Jianke Engineering Consulting Co., Ltd., Shanghai, 200032, China

## Abstract

With the rapid development of rail transit construction, the prestressed support has been widely used in the underground tunnel project by open cut method. Based on the China Shanghai Metro Line 14 grand World Station project, this paper uses ABAQUS finite element software to simulate multiple groups of schemes under different preload loading paths and different preload loading values, selects the optimal loading scheme, and judges the rationality of the scheme by combining with the actual deformation convergence value of the foundation pit. Results show that : (1) For the same top force, the increase of the top force results in the stress concentration on the bottom of the base pit; (2) Under the condition of the same loading force at all levels of foundation pit support, the stress concentration phenomenon of the underground continuous wall at the bottom of the foundation pit becomes more obvious with the increase of the support top force; (3) With increasing the top force, the total convergence of the soil on both sides of the base pit increases first and then increases, the vertical settlement for both side walls decreases significantly; (4) The unequal pressure loading can be calculated according to the static earth pressure formula, the unequal pressure loading can attenuate the stress concentration on the bottom of the base pit in the context of less change of the soil stress state.

## Keywords

open-cut method; pre-force support; soft soil; deformation characteristics; force characteristics

# 支护顶力对明挖法车站基坑变形及受力特征研究

阚秋红

上海建科工程咨询有限公司, 中国·上海 200032

## 摘要

随着轨道交通建设的迅猛发展,明挖法地下洞室工程采用具有预顶力的支护结构得到了广泛应用。论文依托中国上海14#线大世界地铁站项目,利用ABAQUS有限元软件对不同预顶力加载路径、不同预顶力加载量值双因素下多组方案进行模拟,选取最优加载方案,并结合基坑实际变形收敛量值判别方案合理性。结果表明:(1)相同顶力作用下,顶力的增大使得基坑底部连续墙应力集中;(2)基坑支护各级顶力加载相同的情况下,随着支撑顶力的增加,地下连续墙于基坑底部位置的应力集中现象更为明显;(3)随着基坑支护顶力的增加,基坑两侧土体的总收敛量呈现出先减小后增大的规律,两侧侧壁土体的垂直沉降量呈现出明显减小的规律;(4)不等压加载量值可以根据静止土压力公式进行计算,不等压加载可以在较少改变土体应力状态的情况下改善地下连续墙基坑底部位置的应力集中现象。

## 关键词

明挖法施工;预顶力支护;软土;变形特征;受力特征

## 1 引言

随着中国上海市轨道交通建设的迅猛发展,地铁隧道、站点不可避免的临近既有建筑物、地下管线或穿越交通繁忙地区<sup>[1]</sup>。对于这类情况,施工过程中控制基坑及施工场地附近的地层沉降具有重要的意义。在地铁车站的施工过程中内

支撑与两侧的支护体系的受力、变形特征是影响附近场地沉降特征的关键因素之一,通过适当的预加载顶力,保证整个支护体系稳定性,以防止施工过程中对既有构筑物产生损害。

高文华与杨林德<sup>[2]</sup>利用有限元软件对深基坑支护结构内力与变形时空效应进行建模计算,认为基坑围护结构的应力分布与支撑结构的力学参数有关。关于支护结构水平位移的情况,Peck<sup>[3]</sup>对围护结构的变形进行了相关研究,认为基坑开挖导致围护结构水平变形的最大点应该位于其顶端。Black-

【作者简介】阚秋红,女,本科学历,高级工程师,从事深基坑及隧道工程研究。

burn & Finno<sup>[4]</sup> 在挖掘过程中收集的性能监测数据中观察到了三维效果,并总结了施工程序,对不同形式的围护结构进行了总结。Golden & Gordon<sup>[5]</sup> 发现钢支撑中不同的钢型号、混凝土支撑中支撑的尺寸、支撑布置方式以及整体支撑结构的刚度,直接影响着支撑效果。张忠苗等<sup>[6,7]</sup> 对杭州某建筑基坑进行了监测,对基坑开挖过程水平支撑的轴力进行了对比分析,经过研究发现,每道支撑设置与否都会对周围支撑的受力产生较大影响。单仁亮等<sup>[8]</sup> 模拟了 PBA 工法下车站导洞的不同开挖方案,通过分析变形与受力状态,得出了影响最小的开挖方案。孙清与王万庆<sup>[9]</sup> 研究了混凝土支撑情况下深基坑开挖过程中支护及其变形问题,采用软件对灌注桩的变形及受力、水平支撑的轴力、地表和基坑土中各点的变形及受力情况进行了数值模拟,并结合现场实测数据,得到基坑各个开挖过暗挖法地铁隧道的变形情况,为此种方式的施工积累了大量的经验。魏龙海等<sup>[10]</sup> 利用 ANSYS 有限元软件对软土地层中隧道开挖模式进行了优化方案研究。杨晓杰等<sup>[11]</sup> 利用 FLAC3D 研究了明挖法施工中地下围护桩对基坑稳定性的影响。孙克国等<sup>[12]</sup> 研究了围挡位移变化的规律,结果发现数值模拟值略大于实际测量。

数值模拟作为一种针对明挖法车站基坑支护稳定性研究较为可靠的计算方法,兼备计算精度高、可重复性强等优点。为了保证施工过程与施工后运营期的地铁场站与既有构筑物的安全与稳定,应在施工前期对内支撑预顶力加载方案进行数值模拟研究,以确定其安全性与合理性,并通过研究结果,对受力、变形规律及趋势形成预判。论文采取 ABAQUS 有限元模拟软件对施工过程进行模拟,采用多组预顶力加载方案进行模拟,依托上海大世界地铁站明挖法施工,进行基坑及地表位移监测,对方案进行验证。

论文针对中国上海地铁大世界站明挖法施工基坑内支撑顶力加载方案进行模拟及现场实测,确定加载量及加载方式。

## 2 项目概况及模拟方案

### 2.1 项目概况

大世界站主体位于金陵东路和金陵中路下,骑跨西藏南路、柳林路,东起云南路,西至龙门路。本站为地下二层岛式站台车站,主体规模 227m×19.6m(内径),站台中心处顶板覆土约 2.48m,底板埋深约 15.62m。大世界西区西端头井基坑净长度 16.6m,净宽 23.5m,开挖深度 17.5m,西段头

井设置 5 道支撑,西段标准段设置 4 道支撑,各支撑位置关系剖面图如图 1 所示。

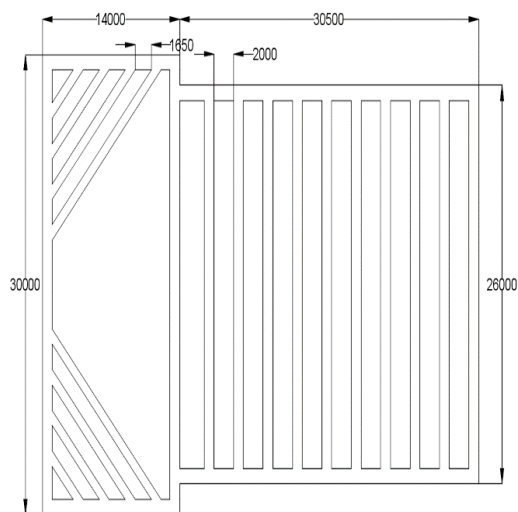


图 1 各支撑位置关系

### 2.2 数值模拟方案简介

论文采用 ABAQUS 有限元模拟软件,土体采用 M-C 弹塑性本构模型。假设最下侧支撑由于基坑底部开挖导致的土体松动对侧壁土无约束作用。计算值以静止土压力为界限,分别对 6 种工况进行等效面积顶力计算,并根据现场施工实际方案进行加载。左侧无顶力下主动土压力为边界,右侧为 3 倍被动土压力等效面积顶力为界。根据支撑布置位置利用静止土压力公式计算其各项土压力,钢支撑顶力工况设置如表 1 所示。

表 1 钢支撑加载顶力设置参数

支撑位置	加载顶力 /kN					
	$P_0$	工况 1	工况 2	工况 3	工况 4*	工况 5
1#	14.4	100	200	400	400	50
2#	74.8	100	200	400	400	100
3#	102.5	100	200	400	400	150
4#	124.1	100	200	400	400	200
5#	237.4	100	200	400	400	250

注:工况 4 采用两级加载,每级加载 200kN。

共设置 19 个分析步,其中包括初始应力平衡分析步、实现自动地应力平衡,地下连续墙开挖作分析部及 5 个开挖、5 个支撑、5 个顶力分析步。土体采用 M-C 弹塑性准则。具体模型如图 2 所示。



图 2 三维模型简图

其中，黄色为土体，蓝色为地下连续墙，红色为基坑内支撑结构。各部件的力学参数如表 2~ 表 4 所示。

表 2 土体力学参数

$c/kPa$	$\varphi/(^\circ)$	$E_s/MPa$	$\rho/(gcm^{-2})$	$\mu$	$w/\%$
23	22.1	73.4	2.50	0.25	27.6%

表 3 连续墙力学及几何参数

厚度 /m	深度 /m	$E_s/GPa$	$\mu$
C35	1	38	0.2

表 4 支撑力学及几何参数

力学参数		
$E_s/GPa$	$\rho/(gcm^{-2})$	$\mu$
210	7.8	0.3

### 2.3 现场实测方案简介

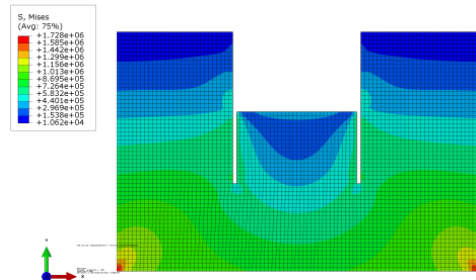
论文依照 200kN 等压加载进行实际加载，于基坑边缘与各支撑位置上表面设置变形监测标，在每次开挖结束后利用莱卡 NA2+GPM3（测量精度  $\pm 0.3mm/km$ ）全站仪计量数据并记录，该数据用于验证数值模拟结果的可靠性。

## 3 模拟结果及分析

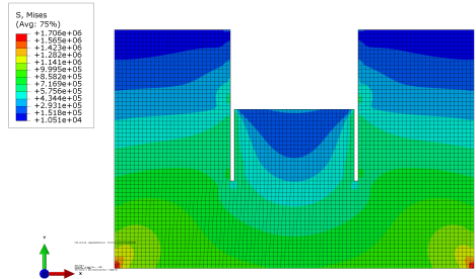
### 3.1 不同加载工况下支护结构及土体变形受力特征

图 3 (a)~(c) 为工况 1、2、3 下的土体受力图；图 4 (a)~(c) 为工况 1、2、3 的支护受力图；图 5 (a)~(c) 为工况 1、2、3 的土体水平方向变形图；图 6 (a)~(c) 为工况 1、2、3 的土体垂直方向变形图。

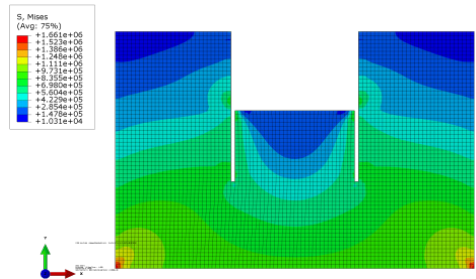
从图 3 中可以看出，应力最大部位集中于基坑底部两侧的位置，应力随着天然土层埋深增大而增大，随着支护结构顶力的增加，土体所受到的力逐渐增大，在基坑底部应力明显增大，基坑两侧的应力较大区域明显扩大，这个现象在侧壁顶端尤为明显。



(a) 工况 1

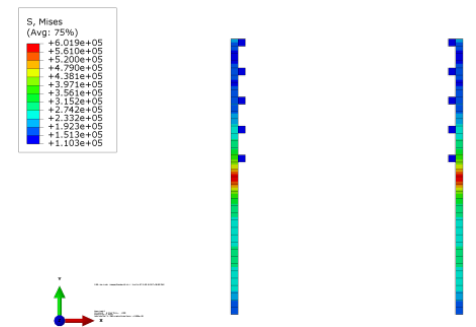


(b) 工况 2

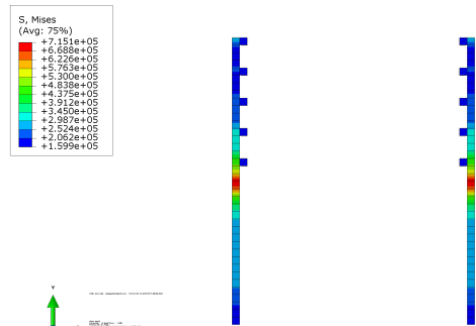


(c) 工况 3

图 3 土体受力状态



(a) 工况 1



(b) 工况 2

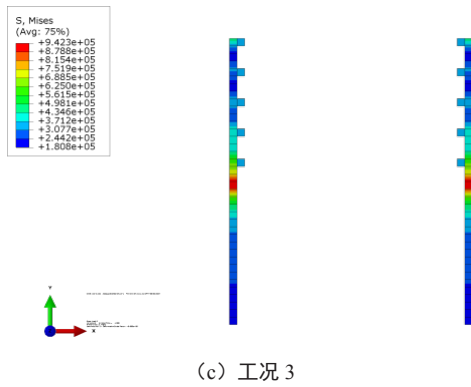
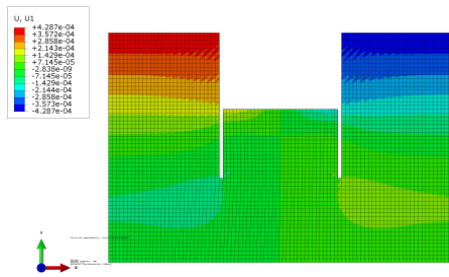
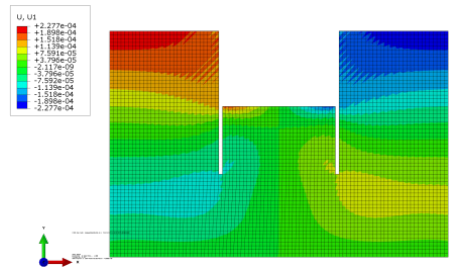


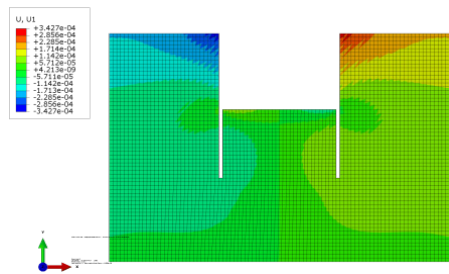
图 4 支护受力状态



(a) 工况 1

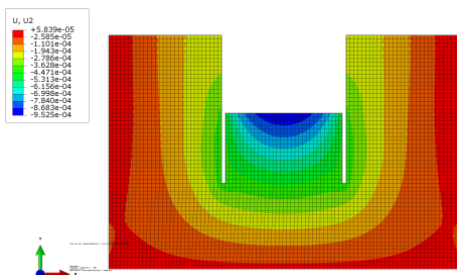


(b) 工况 2

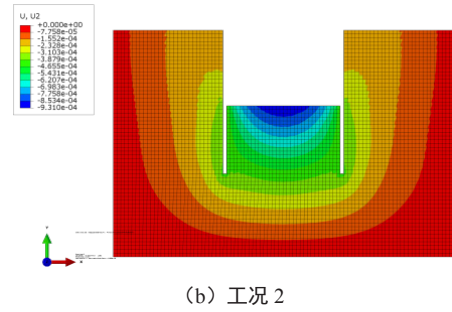


(c) 工况 3

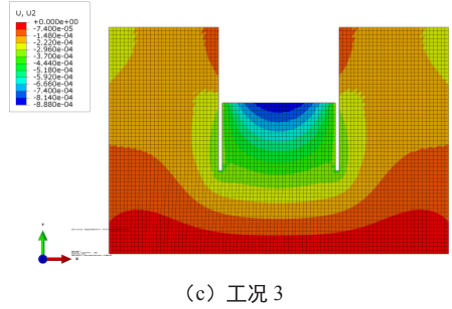
图 5 土体水平方向变形特征



(a) 工况 1



(b) 工况 2



(c) 工况 3

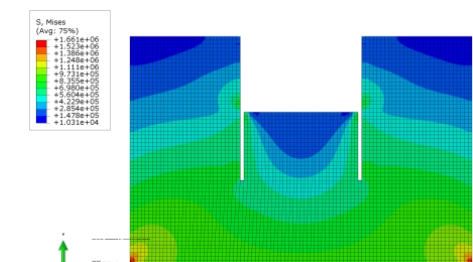
图 6 土体垂直方向变形特征

从图 4 中可以看出，不同加载模式影响支护结构及土体变形模式，顶力越大，基坑地面处地下连续墙应力显著增大，这是由于地下连续墙相当于一个悬臂梁，在约束条件变化位置易出现应力集中的现象，可考虑在该位置增加约束或适当采取不等量加载的方式缓解应力集中。同时随着顶力从 100kPa 增加至 400kPa，地下连续墙在顶力施加位置出现了具有冲切性质的应力集中，如图 4 (c) 所示，因此当顶力增加的同时，不仅需要考虑土体的应力状态由主动土压力状态转化为被动土压力状态，也应考虑到支撑顶力过大时对圈梁及地下连续墙的冲切作用，应适当考虑放大截面、优化材料确保顶力均匀传递。从图 5 中可以看出，随着支护顶力的增大，基坑两侧土体的总收敛量呈现出先减小后增大的规律。这说明在逐渐增大顶力的过程中，墙后土体并非顶力越大水平位移越小，当大于临界值后，土体水平方向上的变形呈现出随顶力增大而增大的现象。从图 6 中可以看出，随着顶力的增大，基坑两侧侧壁土体的垂直沉降量呈现出明显减小的规律，且基坑底部隆起量值变化更为剧烈，但总体量值体现出逐渐减小的趋势。这说明地下连续墙上作用的支护结构顶力有效地抑制了基坑底部的隆起趋势。

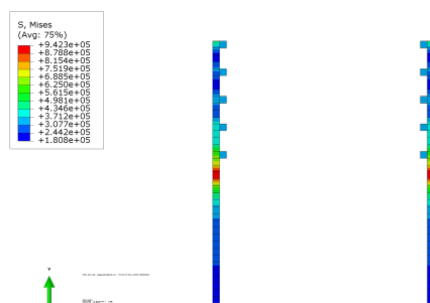
### 3.2 不同加载模式变形受力特征

图 7 (a) ~ (c) 为工况 4 下的土体受力、支护受力及土体变形云图。基坑受力最大值出现在基坑底部两侧位置，地下连续墙在顶力加载位置有明显的应力增大现象，远离加载

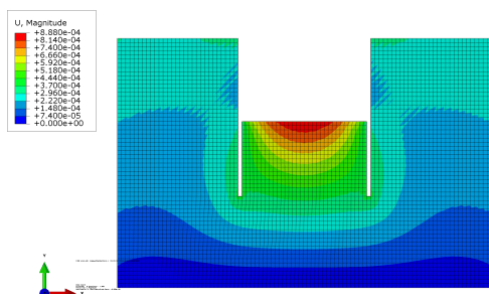
位置，应力较小。变形矢量和最大值出现在基坑底部。对比工况 3 与工况 4 可以看出支撑架在装置顶力总量一致时，分次加载与一次性加载对整个土体、支护结构的变形受力影响较小，因此在实际施工过程中，可采用合适顶力进行一次性加载。



(a) 土体受力状态



(b) 支护受力状态



(c) 土体变形特征

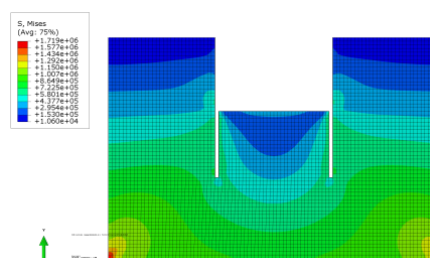
图 7 工况 4

### 3.3 不等压加载模式下变形受力特征

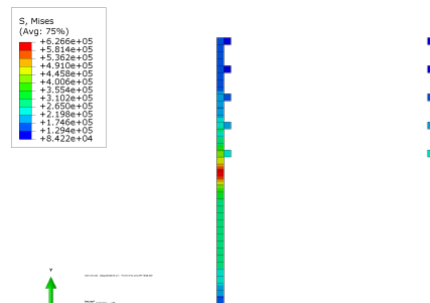
根据前文内容可以判断得知，相同的顶力设置及明挖法基坑的施工方案的支护模式会导致地下连续墙在基坑底部发生应力集中现象，这对施工安全有较大影响，因此论文通过数值模拟软件，考虑计算静止土压力量级，通过设置不等压基坑支护加载模式（工况 5），对不等压加载方案进行研究，结果如图 8（a）~（c）所示。图 8 为工况 5 下的土体受力、支护受力及土体变形云图。

从图 8（a）中可以看出，不等压加载模式对原有土体的应力状态扰动较小，应力随深度增加而增加，最大值出现在

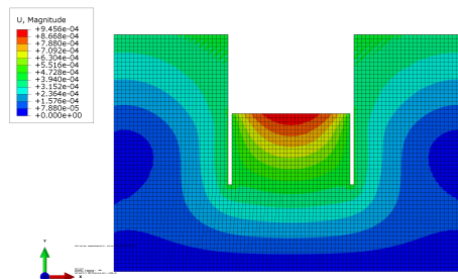
基坑底部两侧位置，基坑底部中间位置应力较小。地下连续墙应力最大位置出现在基坑底部位置，顶部及最底部受力均较小。从图 8（b）与图 4（a）（b）（c）对比可看出，相较于等压加载，不等压加载在满足变形条件的前提下，地下连续墙的应力集中现象得到了明显的改善，并且低压伺服装置较高压伺服装置有更好的经济性。从图 8（c）中可以看出土体变形矢量和最剧烈的位置出现在基坑中部，基坑两壁变形矢量和较小，相较工况 1~ 工况 3，不等压加载模式在位移总量上没有明显的变化，土体的变形特征较等压加载分布更为平缓。



(a) 土体受力状态



(b) 支护受力状态



(c) 土体变形特征

图 8 工况 5

## 4 实测与模拟结果对比分析

表 5 为实际 200kN 加载值与 200kN 模拟值对比结果，考虑到边界效应及基坑端头与标准段开挖方式差异性，因此选取基坑标准段中部位移变形情况进行对比，分别于基坑底部中点、各级支撑顶部、基坑边缘、基坑两侧设置水平收敛监

测点,距基坑边缘10m、20m位置设置垂直沉降监测点。

表5 工况2模拟值与实测值对比

	实测值 /mm	模拟值 /mm
1# 支撑顶部	4.5	3.3
2# 支撑顶部	9.0	8.9
3# 支撑顶部	14.8	11.2
4# 支撑顶部	25.3	18.2
5# 支撑顶部	26.6	22.2
坑底边缘	20.66	15.1
10m	2.1	0.23
20m	0.6	0.15

从表中可以看出,数值模拟结果略小于实测结果,但总体规律相符;变形量随着基坑深度的增加逐级增大,最大值达到26.6mm,坑底边缘模拟结果的收敛量远小于实测收敛量,这是由于数值模拟过程中基坑坑底未开挖部分的水平支撑作用充分发挥,而实际开挖过程中对基坑底部水平支撑作用的扰动幅度远大于理论计算值。实测基坑底部隆起变形量值小于数值模拟值,这是由于基坑底部在开挖过程中持续卸荷,基底回弹完全,而数值模拟过程不能很好的反应该过程。

## 5 结语

论文针对上海地铁大世界站明挖法开挖基坑液压支护结构五种不同工况下预顶力对基坑支护结构的受力、变形特征进行研究,通过ABAQUS有限元模拟软件,选取合适预顶力参数,并与现场实测数据进行对比。结果表明:

(1) 相同加载方案下,不同预加载顶力的大小决定着土体、支护结构受力状态的不同,随着顶力的增长,静止土压力较小区域(基坑较浅部位)的土体受力变大,而静止土压力较大区域(基坑底部附近)的受力变化不大。

(2) 基坑支护各级顶力加载相同的情况下,随着顶力的增加,地下连续墙于基坑底部位置的应力集中现象更为明显。

(3) 随着基坑支护顶力的增加,基坑两侧土体的总收敛量呈现出先减小后增大的规律。随着顶力的增大,基坑两侧侧壁土体的垂直沉降量呈现出明显减小的规律,且基坑底

部隆起量值变化更为剧烈,总体量值体现出逐渐减小的趋势。

(4) 不等压加载模式下,基坑两侧土体的应力状态受到的扰动较小,且地下连续墙与基坑底部位置的应力集中现象得到了较大改善。不等压加载的量值可以根据静止土压力计算公式确定。

## 参考文献

- [1] 钱七虎. 地下工程建设安全面临的挑战与对策[J]. 岩石力学与工程学报,2012(10):1945-1956.
- [2] 高文华,杨林德. 软土深基坑支护结构内力与变形时空效应的影响因素分析[J]. 土木工程报,2001(05):90-96.
- [3] Peck R.B.Deep excavation and tunneling in soft ground[A].In Proceedings of the 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering,State-of-the-Art-Volume[C].Mexico City,1969(21):225-290.
- [4] J.T.Blackburn,R.J.Finno,Three-Dimensional Responses Observed in an Internally Braced Excavation in Soft Clay[J],Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2007(11):1364-1373.
- [5] Goldberg.J.T.,and Gordon,m.d. Lateral Support Systems and Underpinning. Volume III. Construction Methods. 1976(04):127-129.
- [6] 张忠苗,房凯,刘兴旺,等. 粉砂土地铁深基坑支撑轴力监测分析[J]. 岩土工程学报,2010(S1):426-429.
- [7] 单仁亮,黄博,李润军,等. PBA 车站导洞双向开挖方案比选[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版),2016(02):200-208.
- [8] 孙清,王万庆. 灌注桩支护条件下深基坑变形研究[J]. 山西建筑,2010(01):134-135.
- [9] 魏龙海,程勇,刘继国. 超浅埋大断面滨海软土隧道施工工法研究[J]. 隧道建设,2015(11):1141-1149.
- [10] 杨晓杰,刘冬明,张帆,等. 地铁隧道明挖法施工基坑支护稳定性研究[J]. 地下空间与工程学报,2010(03):516-520.
- [11] 孙克国,李术才,李树忱,等. 明挖法地铁车站围护结构变形模拟与预测研究[J]. 岩石力学与工程学报,2008(S1):3210-3215.
- [12] 张顶立,李鹏飞,侯艳娟,等. 城市隧道开挖对地表建筑群的影响分析及对策[J]. 岩土工程学报,2010(02):296-302.