

拉锚地连墙支护深基坑的稳定性分析与优化设计

吴坤铭

(皖西学院 建筑与土木工程学院, 安徽 六安 237012)

摘要: 拉锚地连墙是进行深基坑支护的一种重要型式, 分析拉锚地连墙支护深基坑在开挖施工过程中的稳定性, 并进行拉锚地连墙的优化设计对深基坑工程具有重要的理论指导意义。论文采用有限元法对拉锚地连墙支护深基坑进行开挖过程的稳定性分析及优化设计。以板单元模拟地连墙, 以界面单元模拟地连墙与周边岩土体的接触面, 采用点对点锚杆单元与嵌入式排梁单元分别模拟预应力锚杆的自由段及锚固段。在稳定性分析过程中, 考虑了不同施工工况下预应力锚杆的设置, 进行了塑性及安全稳定性分析。工程算例分析表明, 有限元法可以充分考虑基坑与拉锚地连墙支护结构的几何模型、荷载、结构单元和界面特性等, 基于有限元法能较好地进行拉锚地连墙深基坑支护结构的优化设计。

关键词: 有限元法; 拉锚地连墙; 稳定性分析; 优化设计

中图分类号: TU476

文献标识码: A

文章编号: 2095-8382(2021)04-001-06

On the Stability Analysis and Optimal Design of Deep Foundation Pit Supported by Diaphragm Wall

WU Kunming

(School of Architecture and Civil Engineering, West Anhui University, Luan 237012, China)

Abstract: Diaphragm wall is an important type of deep foundation pit support. The stability analysis of deep foundation pit supported by diaphragm wall during the excavation and construction process and the optimal design during deep foundation pit engineering process have important theoretical guiding significance. The paper uses the finite element method to analyze the stability of the excavation process and optimize the design of the deep foundation pit supported by diaphragm wall. The slab element is used to simulate the diaphragm wall. The interface unit is used to simulate the contact surface between the wall and the surrounding rock and soil. The point-to-point anchor unit and the embedded row of beam unit are used to simulate the free section and the anchor section of the prestressed anchor respectively. In the process of stability analysis, the setting of prestressed anchor rods under different construction conditions is considered, and plasticity and safety stability analysis are carried out. The analysis of engineering examples shows that the finite element method can fully consider the geometric model, load, structural unit and interface characteristics of the deep foundation pit supported by diaphragm wall. Based on the finite element method, the optimal design of the supporting structure of the deep foundation pit supported by diaphragm wall can be better carried out.

Keywords: finite element method; diaphragm wall; stability analysis; optimal design

收稿日期: 2021-05-14

基金项目: 安徽省高校自然科学研究重点项目(KJ2019A0620); 安徽建筑大学建筑结构与地下工程安徽省重点实验室开放基金课题项目(KLBSUE-2020-04); 安徽省高等学校省级质量工程项目(2019jyxm0355)

作者简介: 吴坤铭(1978-), 男, 博士, 副教授, 主要从事岩土力学可靠性研究。

拉锚地连墙支护是用于道路、桥梁、水利工程等边坡与基坑防治领域发展起来的新技术,因其具有整体性好、施工速度快等优点得到了广泛应用,取得显著的经济和社会效益^[1-2]。

当前,拉锚地连墙支护主要集中于理论研究、实验研究以及工程应用方面。

理论研究:文献[1]基于经典薄壳理论,建立静力平衡方程,分析弧形地连墙的侧位移,并应用于工程实际,研究表明该方法可行。文献[2-3]分别建立土与结构共同作用模型、荷载-结构计算模型分析围护结构受力和变形,研究表明上述模型可用于计算支护结构受力变形。文献[4]将神经网络应用于基坑变形预测,以时间序列作为网络输入,可用于预测支护结构变形。

实验研究:文献[5-6]基于信息化监测,对基坑开挖施工过程地连墙变形和墙后土压力进行监测,结合工程算例,研究表明相应施工方法和地连墙支护体系可有效控制基坑变形。文献[7]采用有限元法建立数值模型,用于研究超深地连墙槽段施工诱发地层变形特点。文献[8]采用有限元法对拉锚支护结构施工过程进行分析,研究表明锚杆是控制地连墙位移的有效方法。

工程应用:文献[9]采用硬化模型对地连墙施工进行数值分析,并应用于工程算例,研究表明该数值分析结果与实测情况一致。文献[10]基于深基坑工程实测结果,建立温度场变化引起围护结构受力变形模式,并成功应用于深基坑地连墙围护结构受力变形分析。

上述研究采用多种计算方法和计算模型,分析了支挡结构的内力和变形;基于现场监测及数值分析对拉锚地连墙支护结构与岩土体相互作用进行了分析与计算,实验结果与工程实际较为吻合。但是,当前对拉锚地连墙支护深基坑稳定性分析和优化设计的研究较为缺乏,因此本文采用有限元法结合工程算例对拉锚地连墙支护进行研究。研究表明,随着基坑开挖深度不断增加,沿地连墙墙身分别设置预应力锚杆,可以有效提高基坑安全稳定性;设置两排锚杆,当锚杆水平倾角设置为 25° 时,拉锚地连墙支护作用得到充分发挥,维持基坑稳定性相对最好,支护方案相对最优。因此,采用有限元法能较好地拉锚地连墙深基坑支护进行研究

和分析,为其在工程中的应用提供借鉴。

1 拉锚地连墙与周围岩土体相互作用机理

拉锚地连墙是一种组合支挡结构,沿地连墙墙身设置预应力锚杆,锚杆作为受拉构件,其一端锚固在稳定地层中,另一端锚固在地连墙上。岩土体锚固通过锚杆周围地层抗剪强度传递结构物拉力,与地连墙共同维持岩土体稳定。锚杆施加在地连墙上,改变了悬臂式地连墙受力状态,使地连墙由被动受力变为主动受力状态,减小了墙体内力和变形,使地连墙内力分布更加均匀、合理。

锚杆-地连墙-岩土体相互作用体系,将锚杆与地连墙视为一个整体结构,设置锚杆处视为弹性支座,只考虑锚杆水平分量对结构影响,地连墙简化为受横向变形约束的弹性地基梁。

2 工程算例

某基坑宽 22 m、深 10 m,考虑到基坑开挖及对周边安全稳定影响,对基坑设置拉锚地连墙支护;地连墙深 16 m、厚 0.35 m,墙后设两排预应力锚杆;基坑左侧为一般通道,其邻近基坑一侧距基坑边界 2 m,路面宽 10 m,交通荷载为 10 kPa;土层分布如图 1 所示,第一层为松散细砂质土,第二层为级配良好的密砂层,第三层为深厚软土层;初始潜水位埋深 7 m。各层土体材料参数见表 1,地连墙参数见表 2,锚杆材料参数见表 3,路面材料参数见表 4。

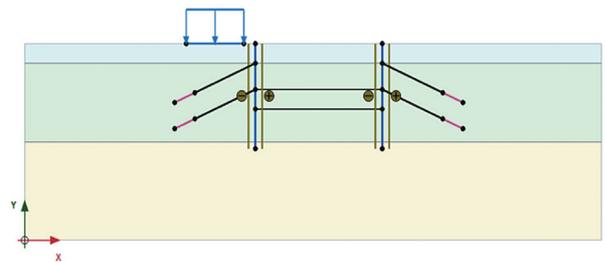


图 1 拉锚地连墙支护基坑开挖剖面图

表 1 各层土体材料参数

层号	土层名称	天然重度 γ' (kN/m ³)	饱和重度 γ (kN/m ³)	粘聚力 c (kPa)	内摩擦角 φ (°)	剪胀角 ψ (°)	泊松比 ν
1	细砂	16	20	1	30	0	0.2
2	密砂	17	20	0	34	4	0.2
3	软土	17	19	5	29	0	0.2

表 2 地连墙参数

参数	名称	数值(弹性)	单位
轴向刚度	EA	12×10^6	kN/m
抗弯刚度	EI	0.12×10^6	$\text{kN} \cdot \text{m}^2/\text{m}$
重度	w	8.3	kN/m/m
泊松比	ν	0.15	

表 3 锚杆材料参数

参数	名称	数值(弹性)	单位
自由段轴向刚度	EA	5×10^5	kN
锚固段圆桩	D	0.3	m
锚固段弹性模量	E	2.5×10^6	kN/m^2
锚固段侧摩阻力	T	400	kN/m
水平间距	L_s	2.5	m

表 4 路面材料参数

参数	名称	数值(各向同性线弹性)	单位
轴向刚度	EA	2.5×10^5	kN/m
抗弯刚度	EI	500	$\text{kN} \cdot \text{m}^2/\text{m}$
重度	w	3	kN/m
泊松比	ν	0	-

3 计算模型及锚杆设置

3.1 数值计算模型的建立

采用有限元 Plaxis 建立数值计算模型^[11-14],模型边界宽 \times 深 = 100 m \times 30 m;定义土层,第一层厚 3 m,第二层厚 12 m,第三层厚 15 m,三个土层底面标高从上至下依次为 27 m、15 m 和 0 m,水头标高 23 m;模型边界条件:两侧垂直边界只约束水平向位移,底部水平边界为固定边界;采用平面应变 15 节点三角形单元模拟基坑土体,在 Plaxis 网格模式下进行网格划分,全局网格疏密度设为中等,基坑开挖区域局部加密网格。设置结构,包括定义路面、地连墙及设置界面。设置开挖步:第一步开挖至细砂层底标高处为开挖底面,第二步在距基坑表面 7 m 处创建一条水平线为开挖底面,第三步在距基坑表面 10 m 处创建一条水平线为开挖底面。按图 1 所示设置锚杆与交通荷载。

计算过程分为 6 个阶段。初始阶段为生成初始应力;阶段 1,激活路面、交通荷载和地连墙;阶段 2,开挖基坑内土体至 3 m 深,无拉锚,无降水;阶段 3,激活第一排锚杆并施加预应力 500 kN;阶段 4,开挖基坑内土体至 7 m 深,无降水;阶段 5,激活第二排锚杆并施加预应力 1 000 kN;阶段 6,降水至坑底,开挖基坑内土体至坑底(10 m 深)。模型两侧边界为固定水头 23 m(与初始潜水位齐平),模型底边界无位移,不透水。基坑开挖到底

时,坑底水压力为零,此处水头设为等于其全局标高 $H=20$ m,水力条件通过地下水渗流计算获得,如图 2 所示。

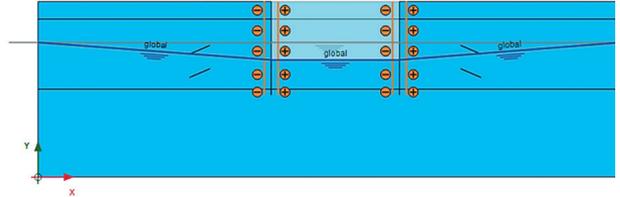


图 2 拉锚地连墙支护基坑水位降至坑底情况

3.2 预应力锚杆设置方案

为了进行深基坑支护优化设计,考虑地连墙预应力锚杆的水平倾角、自由段长度及锚固段长度为变量;在参考相关文献[15]基础上,对预应力锚杆共设置了如表 5 所示的 5 种工况,其中,锚杆共分两排,第 1 排及第 2 排预应力锚杆分别设在距地面下 3 m 及 7 m 处。

表 5 各工况下预应力锚杆设置情况

设置方案	水平倾角 α	自由段长度 (m)	锚固段长度 (m)	全长 (m)
工况 1	20°	11.5	3.7	15.2
工况 2	23°	11.4	3.8	15.2
工况 3	25°	11	3.9	14.9
工况 4	28°	10.8	4	14.8
工况 5	30°	11	4	15

4 计算结果分析

对拉锚地连墙支护基坑开挖过程进行塑性及安全性分析。其中,塑性分析即计算过程不考虑土体材料参数折减,仅用来执行基坑弹塑性变形分析;安全性分析即土体材料参数按下式折减,其本质是采用有限元强度折减法来进行基坑的稳定性分析,求解基坑的安全系数。

$$c' = c / Fs, \phi' = \arctan(\tan \phi / Fs) \quad (1)$$

式中, c 及 ϕ 分别为土体的粘聚力和内摩擦角, Fs 为折减系数,折减后的粘聚力和内摩擦角分别为 c' 和 ϕ' 。

4.1 设置一排锚杆情况

设置一排锚杆时,拉锚地连墙支护基坑开挖塑性及安全性分析有限元网格变形分别见图 3 及图 4。塑性分析各工况下支挡结构的内力见表 6,安全性分析各工况下支挡结构的内力见表 7。

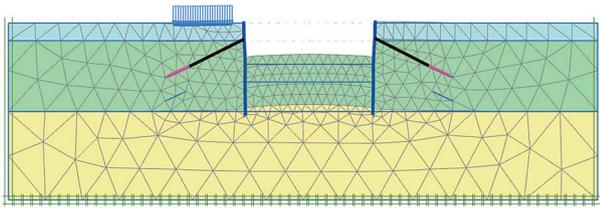


图 3 设置一排锚杆拉锚地连墙支护基坑开挖塑性分析网格变形图

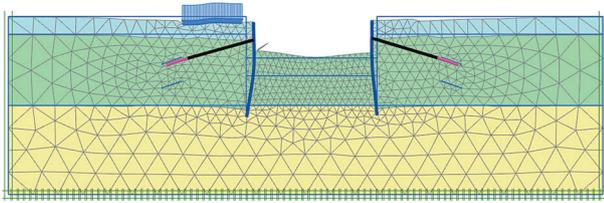


图 4 设置一排锚杆拉锚地连墙支护基坑开挖安全性分析网格变形图

表 6 塑性分析各工况下支挡结构内力

设置方案	水平倾角 α	左侧地连墙弯矩 M 最大、最小值 (kN·m)	右侧地连墙弯矩 M 最大、最小值 (kN·m)	第一排锚杆拉力 F_{Nmax} (kN)
工况 1	20°	+70.44 -104.4	+100.1 -68.16	537.781 (左) 532.162 (右)
工况 2	23°	+69.41 -102.3	+98.46 -67.10	539.864 (左) 534.986 (右)
工况 3	25°	+71.23 -100.4	+96.72 -69.11	542.702 (左) 538.583 (右)
工况 4	28°	+70.13 -97.66	+94.61 -67.85	544.350 (左) 541.238 (右)
工况 5	30°	+68.2 -96.94	+94.14 -65.47	543.324 (左) 540.373 (右)

表 7 安全性分析各工况下支挡结构内力

设置方案	水平倾角 α	左侧地连墙弯矩 M 最大、最小值 (kN·m)	右侧地连墙弯矩 M 最大、最小值 (kN·m)	第一排锚杆拉力 F_{Nmax} (kN)
工况 1	20°	+280.9 -114.2	+104.6 -214.6	710.085 (左) 621.620 (右)
工况 2	23°	+299.4 -124.8	+105.3 -219.0	771.631 (左) 631.134 (右)
工况 3	25°	+402.7 -187.4	+107.7 -234.2	835.507 (左) 739.533 (右)
工况 4	28°	+348.7 -114.8	+105.5 -215.8	792.454 (左) 735.294 (右)
工况 5	30°	+287.2 -79.57	+108.5 -218.7	751.309 (左) 721.22 (右)

由表 6 可知,在塑性分析中,土体材料参数未折减,各工况下支挡结构内力相近。

由表 7 可知,在安全性分析中,工况 1~3 的地连墙墙身截面峰值弯矩 M 及各排预应力锚杆拉力随锚杆水平倾角的增大而逐渐增大,但工况 4~5 的地连墙墙身截面峰值弯矩 M 及各排预应力锚杆拉力随锚杆水平倾角的增大而逐渐减小。由于在计

算中锚杆-地连墙-岩土体为相互作用体系,锚杆与地连墙视为一个整体结构,只考虑锚杆水平分量对结构影响;计算结果表明,工况 3 第一排左侧锚杆拉力为最大,相应的地连墙墙身截面峰值弯矩 M 也为最大。

由表 6~7 可知,安全性分析各工况下支挡结构内力均大于塑性分析各工况下支挡结构内力。由于采用强度折减有限元法对基坑进行安全稳定性分析,土体材料参数被折减,支挡结构承受荷载增大,确保了基坑稳定。

4.2 设置两排锚杆情况

设置两排锚杆时,拉锚地连墙支护基坑开挖塑性分析及安全性分析有限元网格变形分别见图 5 及图 6,塑性分析各工况下支挡结构内力见表 8,安全性分析各工况下支挡结构内力见表 9。

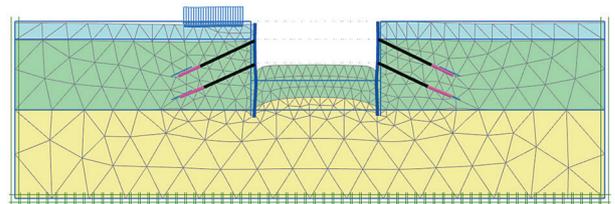


图 5 设置两排锚杆拉锚地连墙支护基坑开挖塑性分析网格变形图

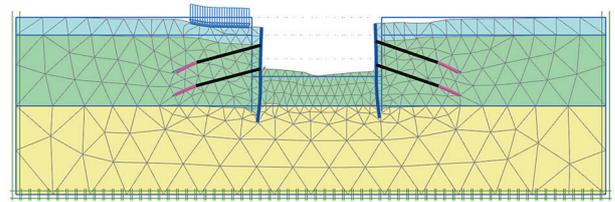


图 6 设置两排锚杆拉锚地连墙支护基坑开挖安全性分析网格变形图

表 8 塑性分析各工况下支挡结构内力

设置方案	水平倾角 α	左侧地连墙弯矩 M 最大、最小值 (kN·m)	右侧地连墙弯矩 M 最大、最小值 (kN·m)	第一排锚杆拉力 F_{Nmax} (kN)	第二排锚杆拉力 F_{Nmax} (kN)
工况 1	20°	+114.9 -160.4	+165.4 -110.7	537.781 (左) 532.162 (右)	1 035.072 (左) 1 033.240 (右)
工况 2	23°	+115.8 -156.3	+162.0 -111.4	539.864 (左) 534.986 (右)	1 034.564 (左) 1 033.533 (右)
工况 3	25°	+117.3 -154.3	+160.8 -112.9	542.702 (左) 538.583 (右)	1 034.422 (左) 1 033.604 (右)
工况 4	28°	+119.2 -148.7	+155.9 -114.3	544.350 (左) 541.238 (右)	1 033.762 (左) 1 033.519 (右)
工况 5	30°	+119.4 -144.7	+152.0 -114.0	543.324 (左) 540.373 (右)	1 033.901 (左) 1 033.205 (右)

表 9 安全性分析各工况下支挡结构内力

设置方案	水平倾角 α	左侧地连墙弯矩 M 最大、最小值 (kN·m)	右侧地连墙弯矩 M 最大、最小值 (kN·m)	第一排锚杆拉力 F_{Nmax} (kN)	第二排锚杆拉力 F_{Nmax} (kN)
工况 1	20°	+287.6	+237.8	678.528 (左)	1 275.013 (左)
		-274.8	-239.3	535.506 (右)	1 107.695 (右)
工况 2	23°	+294.7	+227.7	660.657 (左)	1 260.102 (左)
		-246.9	-252.9	540.441 (右)	1 123.445 (右)
工况 3	25°	+359.8	+236.6	757.224 (左)	1 377.775 (左)
		-283.3	-322.2	615.683 (右)	1 228.974 (右)
工况 4	28°	+341.7	+211.8	672.071 (左)	1 292.853 (左)
		-223.4	-297.8	552.974 (右)	1 156.327 (右)
工况 5	30°	+303.0	+193.2	585.854 (左)	1 175.530 (左)
		-199.0	-247.0	540.373 (右)	1 096.435 (右)

基坑开挖与锚杆设置各阶段安全稳定性计算结果见图 7, 计算过程最终阶段各工况安全系数值见表 10。

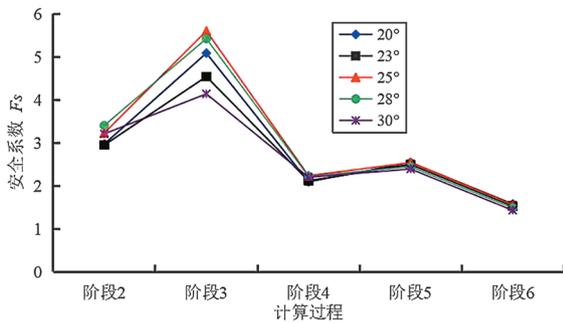


图 7 基坑开挖与锚杆设置各阶段安全稳定性计算结果

表 10 计算过程最终阶段各工况安全系数值

水平倾角 α	20°	23°	25°	28°	30°
安全系数 F_s	1.576	1.530	1.557	1.487	1.431

由表 8 可知, 塑性分析, 土体材料参数未折减, 各工况下支挡结构内力相近。由表 9 可知, 安全性分析, 工况 1~3 地连墙墙身截面峰值弯矩 M 及各排预应力锚杆拉力随锚杆水平倾角增大而逐渐增大, 工况 4~5 地连墙墙身截面峰值弯矩 M 及各排预应力锚杆拉力随锚杆水平倾角增大而逐渐减小。

由表 8~9 可知, 安全性分析各工况下支挡结构内力均大于塑性分析各工况下支挡结构内力。由于采用强度折减有限元法对基坑进行安全稳定性分析, 土体材料参数被折减, 支挡结构承受荷载增大, 确保了基坑稳定。

由图 7 基坑开挖与锚杆设置各阶段安全稳定性计算结果可知, 阶段 3、阶段 5 安全系数值 F_s 显著高于相邻两个阶段的 F_s , 由于阶段 3、阶段 5 分

别设置了预应力锚杆, 从而使基坑安全稳定性得到明显提高; 阶段 3 安全系数值 F_s 大于阶段 5 安全系数值, 主要由于阶段 3 基坑开挖深度小于阶段 5, 因此, 基坑安全稳定性受到土层开挖影响较为明显。

由表 5 可知, 锚杆水平倾角设置 25° 时, 锚杆自由段长度、锚固段长度、全长相对小于其他各工况; 由表 10 可知, 基坑开挖与锚杆设置计算过程最终阶段各工况安全系数值均大于 1.35 满足锚拉式支挡结构安全稳定性要求^[15], 其中, 锚杆水平倾角设置 25° 时, 安全系数 F_s 相对大于其他工况。

因此, 综合上述计算结果分析可知, 设置两排锚杆, 当锚杆水平倾角为 25° 时, 锚杆自由段长度、锚固段长度相对小于其他工况, 基坑开挖与锚杆设置各阶段安全系数、安全性分析下支挡结构内力相对大于其他工况, 使拉锚地连墙支护作用得到充分发挥, 维持基坑稳定性相对最好, 支护方案相对最优。

5 结语

(1) 工程算例表明, 基坑安全稳定性受到土层开挖影响较为明显, 为确保基坑安全稳定, 沿基坑开挖深度方向设置地连墙, 随着开挖深度不断增加, 沿地连墙墙身分别设置预应力锚杆, 可以有效提高基坑安全稳定性, 因此, 拉锚地连墙支护是确保基坑安全稳定性的有效支护方式。

(2) 工程算例表明, 设置两排锚杆, 当锚杆水平倾角为 25° 时, 锚杆全长较小, 基坑开挖与锚杆设置各阶段安全系数、安全性分析下支挡结构内力较大, 使拉锚地连墙支护作用得到充分发挥, 维持基坑稳定性相对最好, 支护方案相对最优。

(3) 拉锚地连墙是深基坑支护的一种重要型式, 文中采用强度折减有限元法结合工程算例进行研究和探索, 研究结果对相关工程应用具有一定的借鉴意义。

参考文献:

[1] 耿大新, 余小强, 童立红, 等. 弧形地连墙侧位移计算的新方法 [J]. 岩土工程学报, 2016, 38 (12): 2272-2277.
 [2] 肖潇, 李明广, 陈锦剑, 等. 基坑开挖对围护墙竖向变形的影响机理 [J]. 上海交通大学学报, 2018, 52 (12): 1552-1558.

(下转第 88 页)

化建设。基于大成智慧理论,“智慧”不等于“智能”,而是“量智”与“性智”的结合,智慧城市建设不仅仅是各个领域的数字化转型,而是城市不同要素、资本的融合发展。智慧城市建设需要解决好城市管理、服务、发展等多个问题,功能主义和科学技术是理性方法与技术基础,人本主义与文化艺术是感性方法和人文基础,这两个层面不是互相取代的替代关系,而是多线并行的协同发展关系。总之,智慧城市建设需要以功能主义和人本主义的融合为建设导向,兼顾“量智”与“性智”建设,做到科学与艺术并行。

参考文献:

- [1] 宋刚,朱慧,童云海.钱学森大成智慧理论视角下的创新 2.0 和智慧城市[J].办公自动化,2014,19(17):7-13.
- [2] 探究大成智慧 推进基于物联网和创新 2.0 的智慧城市建设——产业前沿技术大讲堂聚焦智慧城市[J].办公自动化,2017,22(2):15-16,20.
- [3] 苗东升.再释大成智慧——钱学森晚年思想解读之一[J].西安交通大学学报(社会科学版),2015,35(2):75-82.
- [4] 段汉明,余淑君.智慧类型、钱学森智慧与智慧城市[J].智能城市,2020,6(6):20-24.
- [5] 韩兆柱,马文娟.“互联网+”背景下智慧城市建设路径探析[J].电子政务,2016(6):89-96.
- [6] 张诗雨.国外城市规划的基本特征与理论奠基——国外城市治理经验研究之四[J].中国发展观察,2015(5):75-79.
- [7] 李冬冬,汪永平.赫曼·赫兹伯格的结构主义思想[J].华中建筑,2006,24(8):13-15.
- [8] 许振晓,都林.“后现代主义”城市发展新途径——一种人文主义的解读[J].城市学刊,2016,37(6):31-35.
- [9] 曲凌雁.城市人文主义的兴起、发展、衰落与复兴再生[J].上海城市规划,2001(3):20-22.
- [10] 王卉.科学主义和人本主义对现代城市规划的影响[J].北方工业大学学报,2009,21(3):88-94.
- [11] 金忠明,肖鑫.智慧城市建设视野下的智慧人才培养[J].教育发展研究,2013,33(23):19-25.
- [12] 柴彦威,申悦,陈梓烽.基于时空行为的人本导向的智慧城市规划与管理[J].国际城市规划,2014,29(6):31-37,50.
- [13] 吴绍珍.论城市文明视域下公众素质的提升[J].丝绸之路,2013(8):147-149.
- [14] 张孝丽.基于传统历史文化资源的山东省人文型智慧城市建设对策[J].住宅与房地产,2019(31):4.
- [15] 宋刚,郭伦.创新 2.0 视野下的智慧城市[J].城市发展研究,2012,19(9):53-60.
- [16] 辜胜阻,王敏.智慧建设的理论思考与战略选择[J].中国人口·资源与环境,2012,22(5):74-80.
- [3] 薛光桥,肖明清,郭志明.变刚度地连墙的计算方法及受力变形特性研究[J].铁道工程学报,2015,32(10):109-114.
- [4] 王雨,刘国彬,屠传豹.基于遗传-GRNN 在深基坑地连墙测斜预测中的研究[J].岩土工程学报,2012,34(S1):167-171.
- [5] 贺炜,凡子义,崔剑峰,等.坭洲水道桥圆形地连墙支护体系监测与分析[J].地下空间与工程学报,2019,15(2):549-555.
- [6] 李韬,刘波,褚伟洪,等.顺逆作同步下超深大基坑地连墙变形实测分析[J].地下空间与工程学报,2018,14(S2):828-837.
- [7] 秦会来,李峰,郭院成.超深地连墙槽段施工的三维数值分析[J].岩土工程学报,2013,35(S2):335-340.
- [8] 杨泰华,张峰,贺怀建,等.拉锚式支护结构水平位移影响因素的有限元分析[J].武汉科技大学学报,2009,32(3):330-333.
- [9] 朱宁,周洋,刘维,等.苏州粉土地层地连墙施工对地层扰动影响研究[J].岩土力学,2018,39(S1):529-536.
- [10] 胡琦,凌道盛,程泽海,等.温度应力对环形地连墙围护结构受力变形的影响分析[J].岩土工程学报,2013,35(11):2139-2143.
- [11] 史吏,倪定宇,闫自海,等.软土地区偏压基坑抗隆起稳定安全系数的强度折减法研究[J].岩土工程学报,2019,41(S1):13-16.
- [12] 邵新军,段鹏辉,王磊.基坑开挖对邻近管线变形影响及控制措施研究[J].郑州大学学报(工学版),2020,41(5):66-71.
- [13] 王丽,郑刚.逆作法开挖坑底工程桩差异回弹有限元分析[J].中国科学技术大学学报,2017,47(3):274-282.
- [14] 程涛,许万辉,胡仁杰,等.深基坑开挖引起邻近管线位移影响的数值分析[J].土木工程与管理学报,2016,33(6):16-21.
- [15] 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.

(上接第 5 页)