

考虑土体堆积与泥浆压力的地连墙抓斗成槽推压阻力计算方法^{*}

曹 昱¹ 孟洪峰¹ 王 芊¹ 王晓辉² 李 杰³ 陈福旦⁴

(1. 宁波轨道交通集团有限公司建设分公司, 315101, 宁波; 2. 中铁一局集团城市轨道交通工程有限公司, 214105, 无锡;
3. 中铁十一局集团有限公司, 430061, 武汉; 4. 浙江华展研究设计院股份有限公司, 315012, 宁波)

摘 要 [目的] 随着我国城市轨道交通的快速发展, 车站基坑地连墙的开挖深度不断增加, 穿越的土层也越来越复杂。地连墙抓斗成槽施工的直接作用对象为土体, 抓斗在不同土层中受到的挖掘阻力直接影响施工的成本、成槽质量及效率。但现有研究中针对地连墙抓斗成槽推压阻力的研究较少, 多集中在河道疏浚等工程领域, 且未能充分考虑斗内土体堆积和泥浆存在对推压阻力的影响。因此需对地连墙抓斗成槽推压阻力计算方法进行针对性研究。[方法] 针对地连墙液压抓斗成槽施工, 分析了挖掘过程中土体的破坏、运动以及堆积特性, 在现有模型的基础上引入了斗内土体堆积角以及泥浆压力, 利用塑性极限分析方法构建了改进的推压阻力计算模型, 并推导出了相对应的计算公式。[结果及结论] 所构建模型计算得到的挖掘过程中抓斗推压阻力计算结果与试验结果间的误差为 -0.55% 。验证了所推导模型的可用性, 同时也证明了计算抓斗推压阻力时考虑斗内土体堆积和泥浆压力影响的可行性与正确性, 具有实际应用价值。

关键词 城市轨道交通; 车站基坑; 抓斗成槽; 推压阻力; 堆积角; 泥浆压力; 塑性极限分析

中图分类号 TU551.4⁺²

DOI:10.16037/j.1007-869x.20253053

Thrust Resistance Calculation Method in Diaphragm Wall Grab Trenching Considering Soil Accumulation and Slurry Pressure

CAO Yu¹, MENG Hongfeng¹, WANG Qian¹, WANG Xiaohui², LI Jie³, CHEN Fudan⁴

(1. Construction Branch of Ningbo Rail Transit Group Co., Ltd., 315101, Ningbo, China; 2. Urban Rail Transit Engineering Co., Ltd. of China Railway First Group Co., Ltd., 214105, Wuxi, China; 3. China Railway 11th Bureau Group Co., Ltd., 430061, Wuhan, China; 4. Zhejiang Huazhan Research and Design Institute Co., Ltd., 315012, Ningbo, China)

^{*} 上海市自然科学基金面上项目(20ZR1459900)

Abstract [Objective] With the rapid development of urban rail transit in China, the excavation depth of station foundation pit diaphragm wall is increasing continuously, and the soil layers that are excavated through is becoming more complex. The direct object of diaphragm wall grab trenching is the soil, and the excavation resistance encountered by grab in different soil layers directly affects the construction costs and trenching quality/efficiency. However, there are few studies on the thrust resistance of diaphragm wall grab trenching, and most of them focus on engineering field such as river dredging, without comprehensively considering the impact of soil accumulation and slurry in grab on thrust resistance. Therefore, it is necessary to conduct targeted research on the thrust resistance calculation method in diaphragm wall grab trenching. [Method] Aiming at diaphragm wall hydraulic grab trenching construction, the failure, movement, and accumulation characteristics of soil in the excavation process are analyzed. Based on the existing model, the soil accumulation angle and slurry pressure in grab are introduced, and an improved calculation model of thrust resistance is constructed using plastic limit analysis method, and the corresponding calculation formula is derived. [Result & Conclusion] The error between the calculated results of thrust resistance during grab excavation by the constructed model and the experimental results is -0.55% . The availability of the derived model is verified, and the feasibility and correctness of considering the impact of soil accumulation and slurry pressure in grab when calculating grab thrust resistance are also proven, contributing practical application value.

Key words urban rail transit; station foundation pit; grab trenching; thrust resistance; accumulation angle; slurry pressure; plastic limit analysis

0 引言

目前, 基坑地下连续墙成槽施工的常用设备是

液压抓斗成槽机,随着地连墙的开挖深度不断增加,穿越的土层也越来越复杂^[1-2]。地连墙抓斗成槽施工的直接作用对象为土体,抓斗在不同土层中受到的挖掘阻力直接影响施工成本、成槽质量及效率^[3]。文献[4]针对高强度硬岩和深层淤泥覆盖下的特殊施工难题,提出了一种适应复杂地质条件的地连墙成槽工艺和设备整合方案。文献[5]针对常规的成槽机液压抓斗不能掏挖既有管线下方的土体的问题,提出了一种改进的成槽机液压抓斗结构,并介绍了改进后的地连墙施工工序。目前,关于抓斗成槽的研究聚焦于针对不同的施工工况对施工工艺进行优化,而并未针对抓斗在不同土层中的适应性进行深入研究。针对抓斗推压阻力的研究是抓斗适应性分析的关键内容。推压阻力由抓斗底板推压土体破坏变形而产生,计算方法通常为塑性极限分析法^[6]。文献[6]基于散体变形理论假设,利用对数夹层机构模拟了土体的破坏面,进而建立了适用于重力式长杆疏浚抓斗的推压阻力计算模型。文献[7]基于文献[6]的方法进行改进,考虑了斗内土体堆积的影响,将斗内土体堆积仅以重力形式外加到推压阻力上,从而优化了疏浚挖掘过程中推压阻力的计算方式。但关于地连墙抓斗成槽施工中抓斗推压阻力的研究仍不完善,特别是斗内的土体堆积效应和泥浆作用对推压阻力的影响未被完全考虑,导致计算结果偏小。近年来,机器学习方法在阻力预测领域得到了应用^[8-11],但在推压阻力预测方面仍存在局限性,体现在对大规模训练数据的依赖。

因此,本文在既有模型的基础上,引入斗内土体堆积角 β 和泥浆压力 P_s 建立新的力学模型。通过与模型试验结果进行对比,证明在计算抓斗推压阻力时考虑斗内土体堆积和泥浆压力影响的可行性与正确性。

1 抓斗推压阻力计算模型

在抓斗闭合过程中,底板不断对土体施加压力,土体受到挤压而逐渐发生整体性破坏^[12]。此时,如果液压缸的推力不发生变化,土体将继续破裂并形成破坏面,抓斗底板对土体的推力即为土体的极限承载力。利用塑性极限分析方法,通过土体在极限状态下的力学特性,结合虚功原理和塑性理论,能够直接计算出土体的极限承载力^[7]。

1.1 塑性极限分析法的假设和定理

塑性极限分析法基于理想塑性假设、莫尔-库伦屈服条件、虚功率原理以及极限荷载的上下限定理。其中,理想塑性假设定义了土体的力学行为,莫尔-库伦破坏理论提供了土体的屈服条件,虚功率原理建立了能量平衡关系,而极限荷载的上下限定理则通过运动许可场和静力场确定了极限荷载的范围,相关的计算公式见文献[6]。

1.2 推压阻力模型研究

1.2.1 力学模型建立

土体对抓斗的作用力为推压阻力 R ,抓斗对土体的作用力为土体的极限破坏荷载 P , $R = P$ 。 R_n 和 P_n 分别是 R 和 P 沿抓斗底板的垂直分量,夹角为 δ 。取单侧的受压土体为研究对象,并假设对称中心线处的约束面光滑,模型如图1所示。 R 或 P 与土体的力学特性,与土体的黏聚力 c 、内摩擦角 ϕ 、重度 γ 、斗内土体的堆积角 β 、挖掘深度 H 、泥浆压力 P_s 和挖掘角度 α 有关。

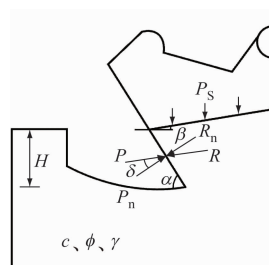


图1 抓斗推压切入土体模型示意图

Fig. 1 Diagram of grab pushing and pressing into the soil model

1.2.2 塑性破坏机构确定

塑性土体破坏机构示意图如图2所示。当对称加载时两侧土体塑性破坏区相互干涉时,刚性区 $DF'EF$ 运动方向垂直向上。土体内的剪切破坏带过 A 点,包含直线段 AB 和 CD 、对数螺旋线 BC 及破坏带 DF 。其中, AB 段的长度由其对应的角度 ρ 所确定, BC 段的长度由角度 ψ 所确定, CD 及 DF 段的长度则由 A 点与对称中心线间距 L_{A1} 所确定。假定刚性区 OAB 、 $OCDF$ 的位移速度分别为 v_1 和 v_2 ,由于 B 、 C 两点是光滑的,故 B 、 C 两点的位移速度也是对数螺旋区 OBC 沿射线 OB 、 OC 的位移速度。 v_1 的方向垂直于 OB , v_2 的方向垂直于 OC ,与破坏面切线夹角为 ϕ 。 v_3 为 DEF 的位移速度,垂直

向上,与 v_2 的速度差为 v_{23} , v_{23} 与 DF 段的夹角为 ϕ 。
 OA 段的位移速度 v_0 与 OA 垂直,其相容速度如图3所示, v_0 与 v_1 的夹角为 ρ 。假设土体的外摩擦角 δ 小于内摩擦角 ϕ ,土体相对于抓斗底板 OA 只有切向滑动而没法向分离,即 v_0 和 v_1 的速度差 v_{01} 的方向沿着 OA 向上,各速度的计算公式见文献[6]。

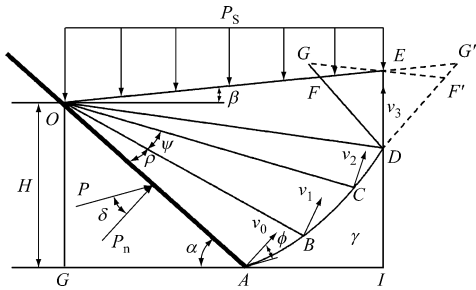


图2 塑性土体破坏机构示意图

Fig. 2 Diagram of plastic soil failure mechanism

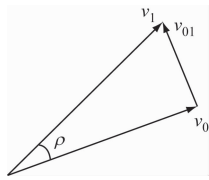


图3 相容速度示意图

Fig. 3 Compatible speed schematic diagram

引入干涉系数 μ , 量化抓斗成槽过程中两侧土体因塑性破坏区域重叠而产生的相互作用程度。当 $\mu > 0$ 时, 左右两侧土体发生干涉。 μ 的计算公式

$$W_{OBC} = \frac{-\gamma H^2 v_0 \cos^2(\rho - \phi)}{2 \sin^2 \alpha \cos^2 \phi \cos \rho (1 + 9 \tan^2 \phi)} \{ \cos(\alpha - \rho) [-3 \tan \phi + (3 \tan \phi \cos \Psi + \sin \Psi) \exp(3 \Psi \tan \phi)] + \sin(\alpha - \rho) [1 + (3 \tan \phi \sin \Psi - \cos \Psi) \exp(3 \Psi \tan \phi)] \} \quad (8)$$

$$W_{OCDF} = \frac{v_0 H^2 \cos(\alpha - \rho - \Psi) \exp(\Psi \tan \phi)}{\cos \rho} \left\{ \frac{\cos^2(\rho - \phi) \sin(\alpha + \beta - \rho - \Psi) \exp(2 \Psi \tan \phi)}{2 \sin^2 \alpha \cos \phi \sin(\alpha + \beta + \phi - \rho - \Psi)} - \frac{\mu^2 \tan \beta \cos(\alpha + \beta + \phi - \rho - \Psi)}{\cos(\alpha + \phi - \rho - \Psi - \beta)} - \mu^2 [\cos(\alpha + \phi - \rho - \Psi) - \tan \beta \sin(\alpha + \phi - \rho - \Psi)] \cdot \left[1 - \frac{2 \sin \beta \sin(\alpha + \phi - \rho - \Psi)}{\cos(\alpha + \phi - \rho - \Psi - \beta)} \right] \right\} \quad (9)$$

$$W_{DEF} = \frac{\mu^2 H^2 v_0 \cos(\alpha - \rho - \Psi) \exp(\Psi \tan \phi)}{\cos \rho} \left\{ [\cos(\alpha + \phi - \rho - \Psi) - \tan \beta \sin(\alpha + \phi - \rho - \Psi)] \cdot \left[1 - \frac{2 \sin \beta \sin(\alpha + \phi - \rho - \Psi)}{\cos(\alpha + \phi - \rho - \Psi - \beta)} \right] \right\} \quad (10)$$

3) 泥浆压力的功率 W_s :

土体表面泥浆压力 P_s 受其与泥浆表面的距离

为:

$$\mu = \frac{\cos \beta \cos(\rho - \phi) \exp(\Psi \tan \phi)}{\sin \alpha \cos(\alpha + \beta + \phi - \rho - \Psi)} - \left(\cot \alpha + \frac{L_{AI}}{H} \right) \quad (1)$$

1.2.3 土体内部能量耗散率

1) 沿 OA 段的能量耗散率 D_1 :

$$D_1 = P_n v_0 \tan \delta \tan \rho \quad (2)$$

2) 沿 AB 段的能量耗散率 D_2 :

$$D_2 = c H v_0 \sin \rho / \cos \rho \sin \alpha \quad (3)$$

3) 沿 BC 段的能量耗散率 D_3 :

$$D_3 = \frac{c H v_0 \cos(\rho - \phi) [\exp(2 \Psi \tan \phi) - 1]}{2 \sin \alpha \sin \phi \cos \rho} \quad (4)$$

4) 沿 CD 、 DF 段的能量耗散率 D_4 :

$$D_4 = \frac{c v_0}{\cos \rho} \left[-\frac{2 \mu H \sin \beta \cos \phi \exp(\Psi \tan \phi)}{\cos(\alpha + \phi - \beta - \rho - \Psi)} + \frac{H \cos(\rho - \phi) \sin(\alpha + \beta - \rho - \Psi) \exp(2 \Psi \tan \phi)}{\sin \alpha \cos(\alpha + \beta + \phi - \rho - \Psi)} \right] \quad (5)$$

1.2.4 外荷载的功率

本文所建立的力学模型综合考虑了抓斗底板的推力、土体重力及泥浆的附加压力等外载荷因素。

1) 抓斗底板推力的功率 W_p :

$$W_p = P_n v_0 \quad (6)$$

2) 土体自重功率 W :

$$W_{OAB} = -\frac{\gamma H^2 v_0 \tan \rho \cos(\rho - \phi) \cos(\alpha - \rho)}{2} \quad (7)$$

影响, O 点离泥浆表面距离为 h , 泥浆重度为 γ_s , 其中 L_{OE} 、 L_{EF} 、 L_{OF} 分别是 OE 、 EF 、 OF 段长度。

$$W_s = -\frac{\gamma_s v_0 \cos \beta \cos(\alpha - \rho - \Psi) \exp(\Psi \tan \phi)}{\cos \rho} \cdot \left\{ h(L_{OF} + 2L_{EF}) - \left[\frac{L_{OF}^2}{2} + (L_{OF} + L_{OE})L_{EF} \right] \sin \beta \right\}$$

$$L_{OE} = \frac{H \cot \alpha + L_{AI}}{\cos \beta}$$

$$L_{EF} = \mu H \frac{1 - \tan \beta \tan(\alpha + \phi - \rho - \Psi)}{\sin \beta \tan(\alpha + \phi - \rho - \Psi) + \cos \beta}$$

$$L_{OF} = \frac{H \cot \alpha + L_{AI}}{\cos \beta} - \mu H \frac{1 - \tan \beta \tan(\alpha + \phi - \rho - \Psi)}{\sin \beta \tan(\alpha + \phi - \rho - \Psi) + \cos \beta} \quad (11)$$

1.2.5 推压阻力计算模型

图2所给定的塑性破坏机构中,参数 ρ 和 Ψ 独立变化,其不同的组合可构造出不同的塑性破坏面。根据虚功率原理可得:

$$\sum D = \sum W \quad (12)$$

$$K_{c_4} = \frac{H}{(1 - \tan \delta \tan \rho) \cos \rho} \left[\frac{\cos(\rho - \phi) \sin(\alpha + \beta - \rho - \Psi) \exp(2\Psi \tan \phi)}{\sin \alpha \cos(\alpha + \beta + \phi - \rho - \Psi)} - \frac{2\mu \sin \beta \cos \phi \exp(\Psi \tan \phi)}{\cos(\alpha + \phi - \beta - \rho - \Psi)} \right] \quad (16)$$

$$K_{\gamma_1} = \frac{H^2}{(1 - \tan \delta \tan \rho) \cos \rho} \cdot \frac{\sin \rho \cos(\rho - \phi) \cos(\alpha - \rho)}{\sin^2 \alpha \cos \phi} \quad (17)$$

$$K_{\gamma_2} = \frac{H^2}{(1 - \tan \delta \tan \rho) \cos \rho} \cdot \frac{\cos^2(\rho - \phi)}{\sin^2 \alpha \cos^2 \phi (1 + 9 \tan^2 \phi)} \{ \cos(\alpha - \rho) [-3 \tan \phi + (3 \tan \phi \cos \Psi + \sin \Psi) \exp(3\Psi \tan \phi)] + \sin(\alpha - \rho) [1 + (3 \tan \phi \sin \Psi - \cos \Psi) \exp(3\Psi \tan \phi)] \} \quad (18)$$

$$K_{\gamma_3} = \frac{2H^2 \cos(\alpha - \rho - \Psi) \exp(\Psi \tan \phi)}{(1 - \tan \delta \tan \rho) \cos \rho} \left\{ \frac{\cos^2(\rho - \phi) \sin(\alpha + \beta - \rho - \Psi) \exp(2\Psi \tan \phi)}{2 \sin^2 \alpha \cos \phi \sin(\alpha + \beta + \phi - \rho - \Psi)} - \mu^2 [\cos(\alpha + \phi - \rho - \Psi) - \tan \beta \sin(\alpha + \phi - \rho - \Psi)] \left[1 - \frac{2 \sin \beta \sin(\alpha + \phi - \rho - \Psi)}{\cos(\alpha + \phi - \rho - \Psi - \beta)} \right] - \frac{\mu^2 \tan \beta \cos(\alpha + \beta + \phi - \rho - \Psi)}{\cos(\alpha + \phi - \rho - \Psi - \beta)} \right\} \quad (19)$$

$$K_{\gamma_4} = \frac{2\mu^2 \cos(\alpha - \rho - \Psi) \exp(\Psi \tan \phi)}{(1 - \tan \delta \tan \rho) \cos \rho} \left\{ [\cos(\alpha + \phi - \rho - \Psi) - \tan \beta \sin(\alpha + \phi - \rho - \Psi)] \cdot \left[1 - \frac{2 \sin \beta \sin(\alpha + \phi - \rho - \Psi)}{\cos(\alpha + \phi - \rho - \Psi - \beta)} \right] \right\} \quad (20)$$

$$K_s = \frac{\gamma_s \cos \beta \cos(\alpha - \rho - \Psi) \exp(\Psi \tan \phi)}{(1 - \tan \delta \tan \rho) \cos \rho} \left\{ h(L_{OF} + 2L_{EF}) - \left[\frac{L_{OF}^2}{2} + (L_{OF} + L_{OE})L_{EF} \right] \sin \beta \right\} \quad (21)$$

约束条件为:

$$0 \leq \rho \leq \frac{\pi}{2}$$

$$0 \leq \rho + \Psi \leq \alpha + \beta$$

$$1 - \tan \delta \tan \rho > 0$$

$$\cos(\rho - \phi) \cos(\alpha - \rho) - \sin \alpha \cos \phi (\cot \alpha + L_{AI}/H) \leq 0$$

$$\cos(\rho - \phi) \cos(\alpha - \rho - \Psi) \exp(\Psi \tan \phi) -$$

式中:

D ——土体内部能量耗散率;

W ——外荷载的功率。

根据极限载荷上限定理,实际破坏载荷通常是在所有破坏模式中对应该最小载荷的值。将式(2)一式(11)代入式(12)可得推压阻力:

$$R_n = P_n = \min \left\{ c \sum K_{c_i} + \frac{1}{2} \gamma \sum K_{\gamma_j} + K_s \right\} \quad (13)$$

式中:

K_{c_i} 、 K_{γ_j} 、 K_s ——土体重力、土体黏聚力和泥浆引起的推压阻力系数。

K_{c_i} 、 K_{γ_j} 、 K_s 随着独立自变量 ρ 、 Ψ 的变化而变化,其中:

$$K_{c_2} = \frac{H \sin \rho}{(1 - \tan \delta \cdot \tan \rho) \cos \rho \sin \alpha} \quad (14)$$

$$K_{c_3} = \frac{H \cos(\rho - \phi) [\exp(2\Psi \tan \phi) - 1]}{2 \sin \alpha \sin \phi \cos \rho (1 - \tan \delta \tan \rho)} \quad (15)$$

$$\sin \alpha \cos \phi (\cot \alpha + L_{AI}/H) \leq 0 \quad (22)$$

得到推压阻力或极限破坏荷载的法相分量 R_n 、 P_n 后,可以确定推压阻力或极限破坏荷载的合力:

$$R = P = c \sum K_{pc} + \frac{1}{2} \gamma \sum K_{p\gamma} + \sum K_{ps} \quad (23)$$

其中, $K_{pc} = K_c / \cos \delta_0$, $K_{p\gamma} = K_\gamma / \cos \delta_0$, $K_{ps} = K_s / \cos \delta_0$ 。

$$\delta_0 = \delta, \delta \leq \phi$$

$$\delta_0 = \arctan \left(\tan \delta + \frac{cH}{P_n \cot \alpha} \right), \delta > \phi \quad (24)$$

式中:

δ_0 ——土体与抓斗底板之间的有效摩擦角。

2 推压阻力计算模型验证

将计算结果与文献[13]的推压阻力试验结果进行对比。试验材料为黏土,推压体的几何尺寸为:宽度 $B = 25$ cm,切入深度 $H = 14$ cm,堆积角 $\beta = 0$,推压体与水平面的夹角 $\alpha = 75^\circ$ 。试验材料的力学特性参数为:重度 $\gamma = 0.0136$ N/cm³,黏聚力 $c = 0.861$ N/cm²,内摩擦角 $\phi = 14.7^\circ$,与推压体的外摩擦系数 $\mu_{\text{ext}} = 0.21$,外摩擦角 $\delta = \arctan \mu_{\text{ext}} = 11.86^\circ$,有 $\delta < \phi$ 。因此, $R = cB \sum K_c / \cos \delta + \frac{1}{2} \gamma B \sum K_\gamma / \cos \delta$ 。根据试验结果,推压阻力约为 763 N。

上述试验工况为半无限长的单侧加载,取较大的开度系数 $L_{\text{Al}}/H = 10$ 。则有: $K_{c_2} = 13.9$ cm, $K_{c_3} = 0$, $K_{c_4} = 19.2$ cm, $K_c = 33.1$ cm; $K_{\gamma_1} = 11.0$ cm², $K_{\gamma_2} = 0$, $K_{\gamma_3} = -23323.9$ cm², $K_{\gamma_4} = 23495.4$ cm², $K_\gamma = 182.5$ cm²; $K_{\text{pc}} = K_c / \cos \delta = 33.81$ cm, $K_{\text{py}} = K_\gamma / \cos \delta = 186.4$ cm²; $R = 758.8$ N, $R_n = 742.8$ N。通过本文推导公式计算得到的挖掘过程中抓斗推压阻力为 760.434 N,与试验结果间的误差为 -0.55% 。

3 结语

本文基于塑性极限分析法,引入斗内土体堆积角 β 和泥浆压力 P_s 建立了挖掘过程推压阻力,该模型较好地反映了斗内土体堆积和泥浆存在带来的推压阻力增加。以既有文献中的试验条件为基础,本文推导模型的计算结果为 760.434 N,与试验值之间的误差约为 -0.55% 。表明采用本文推导模型能够准确分析出抓斗挖掘土体破坏的推压阻力。然而,本研究在建立计算模型时作了一定的假设,使得所推导的推压阻力计算公式更适用于松散或中密土体,对于高黏性土或硬岩的推压阻力计算,仍需进一步探讨。同时,受限于试验条件,模型的验证基于单一工况,对于其他土质和堆积角 β ,其可用性有待进一步研究。

参考文献

- [1] 叶如,王毅,曹昱,等. 软土地层地铁车站超深地下连续墙槽壁稳定性分析[J]. 城市轨道交通研究, 2025, 28(3): 118.
YE Ru, WANG Yi, CAO Yu, et al. Analysis of metro station ultra-deep diaphragm wall trench wall stability in soft soil stratum[J]. Urban Mass Transit, 2025, 28(3): 118.
- [2] 杜岩,殷建国,李文斌,等. 滨海地区土岩复合地层城市轨道交通车站深大基坑施工稳定性分析[J]. 城市轨道交通研究, 2024, 27(3): 182.
DU Yan, YIN Jianguo, LI Wenbin, et al. Stability analysis of deep and large foundation pit construction for urban rail transit station in soil rock composite stratum in coastal area[J]. Urban Mass Transit, 2024, 27(3): 182.
- [3] 张德强. 暗挖车站洞内地下连续墙施工技术[J]. 现代隧道技术, 2020, 57(增刊1): 1102.
ZHANG Deqiang. Construction technology of underground continuous wall in underground excavation station[J]. Modern Tunneling Technology, 2020, 57(S1): 1102.
- [4] 刘钢立,曹东娇,李新龙,等. 淤泥覆盖下高强度硬岩地下连续墙成槽技术研究[J]. 现代隧道技术, 2020, 57(增刊1): 1283.
LIU Gangli, CAO Dongjiao, LI Xinlong, et al. Study on trenching technology of high strength hard rock diaphragm wall covered with mud[J]. Modern Tunneling Technology, 2020, 57(S1): 1283.
- [5] 张标,孙颜顶,田华良,等. 穿越既有管线的地下连续墙施工技术研究[J]. 城市轨道交通研究, 2023, 26(9): 259.
ZHANG Biao, SUN Yanding, TIAN Hualiang, et al. Construction technique for diaphragm wall crossing existing pipelines[J]. Urban Mass Transit, 2023, 26(9): 259.
- [6] 计三有. 散体变形理论及挖掘过程动态仿真的研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2002.
JI Sanyou. Study on granular deformation theory and dynamic simulation of excavation process[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2002.
- [7] 姜益. 基于ABAQUS疏浚抓斗挖掘过程的有限元仿真分析[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2017.
JIANG Yi. Finite element simulation analysis of dredging grab based on ABAQUS[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2017.
- [8] 孙乾洋,周利,丁仕风,等. 基于人工神经网络的极地船舶冰阻力预报方法[J]. 上海交通大学学报, 2024, 58(2): 156.
SUN Qianyang, ZHOU Li, DING Shifeng, et al. An artificial neural network-based method for prediction of ice resistance of polar ships[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2024, 58(2): 156.
- [9] 张颖欣,王占生,陶宇帆,等. 基于机器学习的盾构刀盘斜切混凝土连墙推力预测[J]. 河南科学, 2024, 42(12): 1792.

(下转第53页)

下水渗流场变化规律的影响[J]. 城市轨道交通研究, 2024, 27(8): 217.

ZHANG Xuhai. Seepage point impact in urban rail transit station foundation pit enclosure structure on the variation law of surrounding groundwater seepage field[J]. Urban Mass Transit, 2024, 27(8): 217.

· 收稿日期:2025-02-26 修回日期:2025-03-20 出版日期:2025-06-10

Received:2025-02-26 Revised:2025-03-20 Published:2025-06-10

· 第一作者:陈伟,工程师,819634337@qq.com

通信作者:曹占林,博士研究生,2210741@tongji.edu.cn

· ©《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 31 页)

LIU Xian, ZHANG Chenguang, ZHANG Yan, et al. Experimental study on the longitudinal joint of shield tunnels reinforced with composite cavity[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2015, 12(2): 376.

[20] 柳献,张乐乐,李刚,等. 复合腔体加固盾构隧道衬砌力学行为的宏观分析模型[J]. 现代隧道技术, 2014, 51(5): 78.

LIU Xian, ZHANG Lele, LI Gang, et al. A macroscopic analysis model for the mechanical behaviors of a shield tunnel segment lining reinforced with a composite cavity[J]. Modern Tunnelling

Technology, 2014, 51(5): 78.

· 收稿日期:2023-04-28 修回日期:2023-06-15 出版日期:2025-06-10

Received:2023-04-28 Revised:2023-06-15 Published:2025-06-10

· 第一作者:孙雪兵,正高级工程师,103982434@qq.com

通信作者:柳献,教授,xian.liu@tongji.edu.cn

· ©《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 36 页)

HAI Wenlong, WANG Yahui, WANG Huaixiu. Gas load forecasting based on optimization of GRU neural network using IPSO algorithm[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2023, 42(2): 126.

· 收稿日期:2023-06-02 修回日期:2023-07-06 出版日期:2025-06-10

Received:2023-06-02 Revised:2023-07-06 Published:2025-06-10

· 第一作者:周意,硕士研究生,hbhg_zy@163.com

通信作者:王章琼,副教授,wzqcug@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 42 页)

[19] 张文彤. SPSS 统计分析基础教程[M]. 3 版. 北京:高等教育出版社, 2017.

ZHANG Wentong. Basic course of SPSS statistical analysis[M]. 3rd ed. Beijing: Higher Education Press, 2017.

[20] 段志强,王力,李立功,等. 单盾盾隧道掘进机在砂岩、砂质泥岩地层中的掘进参数关系研究[J]. 城市轨道交通研究, 2019, 22(7): 120.

DUAN Zhiqiang, WANG Li, LI Ligong, et al. Relation of tunneling parameters of single shield TBM in sandstone and sandy mud-

stone stratum[J]. Urban Mass Transit, 2019, 22(7): 120.

· 收稿日期:2023-05-28 修回日期:2023-10-11 出版日期:2025-06-10

Received:2023-05-28 Revised:2023-10-11 Published:2025-06-10

· 第一作者:时健,博士研究生,924532404@qq.com

通信作者:张仕林,博士研究生,高级工程师,zhangshilin.2005@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 47 页)

ZHANG Yingxin, WANG Zhansheng, TAO Yufan, et al. Thrust prediction during diagonal cutting of concrete diaphragm wall for TBM based on machine learning[J]. Henan Science, 2024, 42(12): 1792.

[10] 邱广宇,房欣悦,张旺. 基于机器学习的高速列车车头型多目标优化设计[J]. 大连交通大学学报, 2024, 45(4): 41.

QIU Guangyu, FANG Xinyue, ZHANG Wang. Multi-objective optimization design of high-speed train head shape based on machine learning[J]. Journal of Dalian Jiaotong University, 2024, 45(4): 41.

[11] 史刚. 基于机器学习的装载机铲装作业性能预测与优化研究[D]. 柳州:广西科技大学, 2024.

SHI Gang. Research on prediction and optimization of loader shoveling performance based on machine learning[D]. Liuzhou: Guangxi University of Science and Technology, 2024.

[12] YAO J, EDSON C P, YU S, et al. Bucket loading trajectory optimization for the automated wheel loader[J]. IEEE transactions on vehicular technology, 2023, 72(6): 6948.

[13] 陆怀民,张云廉,刘晋浩. 土壤切削弹粘塑性有限元分析[J]. 岩土工程学报, 1995, 17(2): 100.

LU Huaimin, ZHANG Yunlian, LIU Jinhao. Elastoviscoplastic finite element analysis of soil cutting[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1995, 17(2): 100.

· 收稿日期:2025-02-13 修回日期:2025-04-20 出版日期:2025-06-10

Received:2025-02-13 Revised:2025-04-20 Published:2025-06-10

· 通信作者:曹昱,工程师,515141032@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