

5 补强支护方案^[3]

(1) 顶板补强支护。如图 1，在回采帮侧顶板距帮 500mm 处垂直于顶板打设一排规格为 $\phi 21.8 \times 7300\text{mm}$ 的切顶锚索，间距 1000mm。超前工作面实施，可在回采前超前工作面打设，也可在掘进时提前打设。

(2) 帮部补强支护。如图 2，分别在第一排与第二排、第二排与第三排锚索间沿巷道走向布置 2 排补强锚索，锚索规格： $\phi 21.8 \times 5300\text{mm}$ ；间排距为 $2000 \times 1000\text{mm}$ 。锚索沿走向采用 W 钢带相连，W 钢带规格：2400mm（长） $\times 280\text{mm}$ （宽） $\times 5\text{mm}$ （厚）。

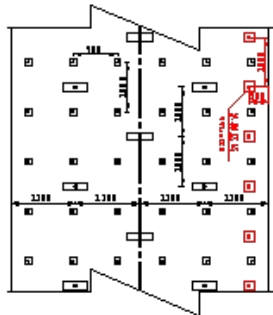


图 1 顶板补强支护示意图

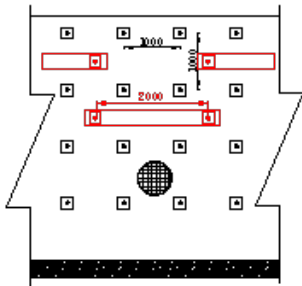


图 2 帮部补强支护示意图

6 巷旁支护及巷内支护设计^[4]

6.1 巷旁支护设计

采用浇筑钢筋砼墙的方式进行巷旁支护。设计墙体浇筑宽度为 1200mm，混凝土强度等级为 C40。采用预置钢筋无横筋开口式柔性模板实现巷旁支护钢混结构。巷旁支护体浇筑位置：靠采空区侧与煤壁相平，顶部处于切顶锚索与巷内锚索之间。柔模墙体约束由 $800 \times 800\text{mm}$ 间距的 $\phi 20 \times 1400\text{mm}$ 对拉锚杆、纵横交错的钢筋梯梁组成；根据瓦斯、自然发火等级以及采空区防治水相关因素，留设瓦斯抽采孔、观测孔、措施孔与排水孔，如图 3 所示。

6.2 巷内支护设计

根据五虎山煤矿 011208 工作面现场情况，结合高应力巷道围岩控制相关案例与巷道围岩控制经验，设计采用“异形墩柱”作为巷内滞后。如图 4，“异形墩柱”由 $\phi 400\text{mm} \times 10\text{mm}$ 厚的厚壁钢管组成的柱体与

$\phi 800 \times 500\text{mm}$ 的柔性模板组成，厚壁钢管内浇筑混凝土填充，顶部采用高水材料充填柔性模板进行接顶；厚壁钢管边缘至柔模墙 1200mm，可复用宽度 2800mm 满足巷道使用条件。

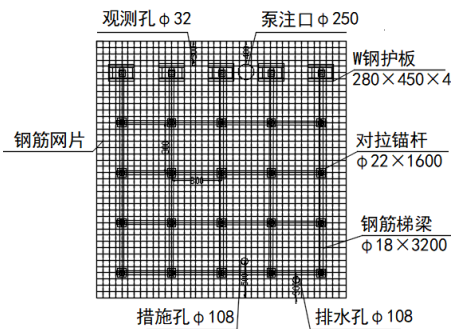


图 3 4m 长柔模结构示意图

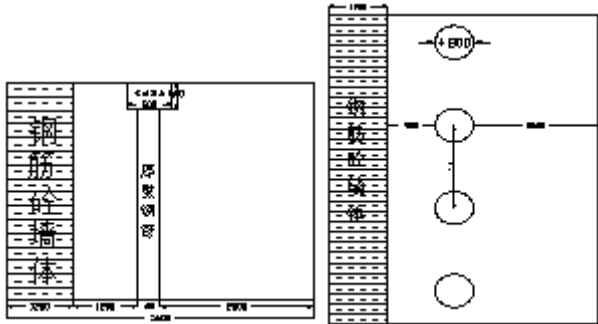


图 4 “墙柱协同”支护示意图

7 结论

在五虎山煤矿 011208 工作面沿空留巷巷道进行近场磨料高压水射流“切割+压裂”短孔切顶卸压施工^[5]及远场定向长钻孔后退式分段水力压裂长钻孔断顶卸压^[6]，通过长短孔结合的多维卸压断顶留巷新工艺完成五虎山煤矿近距离煤层群沿空留巷条件下的多维卸压关键新技术研究，解决了沿空留巷条件下的切顶卸压难题。

参考文献

[1] 靳钟铭, 等. 煤矿坚硬顶板控制[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1994.

[2] 薛顺勋, 宋广太, 库明欣. 煤巷锚杆支护施工指南[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1999.

[3] 侯朝炯, 郭励生, 勾攀峰. 煤巷锚杆支护[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1999.

[4] 华心祝. 沿空留巷巷旁锚索加强支护与参数优化[J]. 煤炭科学技术, 2004(8).

[5] 康红普, 冯彦军. 煤矿井下水力压裂技术及在围岩控制中的应用[J]. 煤炭科学技术, 2017, 45(1): 1-9.

[6] 冯彦军, 康红普. 水力压裂起裂与延展分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(S2): 3169-3179.

Study on the stability of the groove wall at the sunny corner of the Z-type diaphragm wall considering the passage of confined water through the silt strata

Qingyuan Yao¹ Xiaolei Wang²

1. College of Civil Engineering Hebei University of Engineering, Handan, Hebei, 056038, China

2. Handan City Urban Underground Space Engineering Technology Innovation Center., Handan, Hebei, 056038, China

Abstract

In the application of underground diaphragm wall as the enclosure structure in foundation pit engineering, there are few studies on the stability of Z-type diaphragm wall groove formation. Relying on the capacity expansion and upgrading project of Beijing Rail Transit Line 13, the numerical simulation of the construction process of underground diaphragm wall groove formation was carried out by using finite element software, and the stability of the groove wall at the sunny corner of the special-shaped ground connecting wall was investigated from four aspects. The results show that: (1) The risk of instability in this area is higher than that of other parts due to the exposure of both sides and stress concentration at the sunny angle. (2) Through the analysis of soil shear strength index and groundwater height, the soil shear strength mechanical index of soil has a certain influence on the lateral displacement of the groove wall, but with the increase of depth, the influence of soil shear strength mechanical index on lateral displacement gradually weakens. The influence of groundwater level height change on the lateral displacement of the trough wall at the sunny angle is particularly obvious.

Keywords

Z-shaped diaphragm wall; numerical simulation; lateral displacement; Tank wall stabilit

Z 型地下连续墙槽壁稳定性研究

姚庆元¹ 王晓磊²

1. 河北工程大学土木工程学院, 中国·河北 邯郸 056038

2. 邯郸市城市地下空间工程技术创新中心, 中国·河北 邯郸 056038

摘 要

在基坑工程采用地下连续墙作为围护结构的应用方面, 对于Z型地下连续墙成槽稳定性研究较少。依托北京轨道交通13号线扩能提升工程, 通过使用有限元软件对地下连续墙成槽施工过程进行数值模拟, 从5个方面考察异形地连墙阳角处槽壁的稳定。研究表明: 槽壁在阳角处由于两面裸露以及应力集中等因素, 导致该区域的失稳风险相较于其他部分更高。通过对土体抗剪强度指标、地下水高度的分析, 土的土体抗剪强度力学指标对槽壁的侧向位移产生一定影响, 但随着深度的增加, 土体抗剪强度力学指标对侧向位移的影响逐渐减弱; 地下水位高度变化对阳角处槽壁侧向位移的影响尤为明显。

关键词

Z型地下连续墙; 数值模拟; 侧向位移; 槽壁稳定性

1 引言

随着城市现代化进程的加快, 中国的地下轨道交通系统, 正在迅速崛起, 城市地下空间的开发与利用也呈现出大规模发展的趋势。在这一过程中, 地下空间开发的需求日益

增长, 地下连续墙凭借卓越的整体性能、较高的结构强度以及优良的防渗特性, 在地下空间围护结构的选型中愈发普遍。但值得注意的是, 在其施工作业过程中, 特别是在开挖槽沟的环节, 槽壁局部或整体性坍塌的情况仍然偶尔出现。因此, 国内众多专家和学者已就成槽过程中的稳定性问题开展了深入的理论和数值分析研究。

在理论分析方面, 安辰亮^[1]等学者研发了一个用于评估槽壁局部稳定性安全系数的计算公式, 并据此对局部失稳现象展开了量化分析; 丁勇春^[2]等学者对槽壁局部失稳的成因进行了深入研究通过理论运算, 对影响槽壁稳定性的关键因素进行了深入剖析; 路乾^[3]等研究者则将研究重心置于槽壁整体稳定性的理论框架构建上, 提出了计算最小泥浆

【基金资助】国家自然科学基金联合重点基金(基金项目编号: U21A20164), 国家杰出青年科学基金(基金项目: 51825904)。

【作者简介】姚庆元(1999-), 男, 中国河北邢台人, 硕士, 从事岩土方向研究。

重度及相应安全系数的具体方法；黄茂松等结合现场实验，对三维楔形体进行了改进，进一步分析并验证了槽壁的稳定性。

在数值分析方面，资晓鱼等研究了不同成槽顺序和泥浆重度对槽壁位移的影响；殷超凡¹等通过使用 Comsol 软件对挖槽施工过程进行了数值模拟，明确了槽壁变形的关键区域；严朝锋等则利用 ABAQUS 软件对地下连续墙的成槽过程进行了仿真，深入分析了承压水对粉砂层槽壁稳定性的影响；目前对于异形地下连续墙施工时的槽壁稳定性问题研究较少。鉴于此，笔者以北京市 13 号线扩能提升工程文华路站工程为依托，应用 Flac3D 软件对其地下连续墙成槽施工进行研究，分析研究“Z”型地下连续墙阳角处成槽过程中的槽壁变形规律和影响因素以期为类似工程中地连墙成槽稳定性分析和施工参数优化提供参考和借鉴。

2 工程概况

文华路站位于回龙观西大街与文华路交叉口西侧，车站沿回龙观西大街的东西方向布置。该车站为地下两层结构，其中一侧设有岛式站台，另一侧则为侧式站台。

图 1 展示了车站的平面图，其中，站台的中心位置所对应的轨面标高测定为 25.5m。该位置上方覆盖的土层厚度约为 3.3m，而车站底板的埋设深度则达到了约 17.9m。

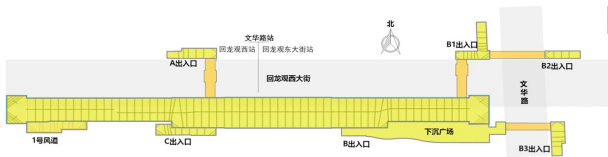


图 1 文华路站平面示意图

3 计算模型建立

3.1 模型基本假定

- (1) 在本研究中，在本文的研究中，我们选用了等效压力来替代泥浆所产生的静态压力效应。
- (2) 对于灰岩层的力学特性，采用摩尔-库伦准则进行建模，而填土层、淤泥质则采用剑桥模型进行描述。
- (3) 假设土体为均质材料，物理特性在各个方向上均保持均匀一致，展现出各向同性的材料属性。建立的有限元模型如图 2 所示。

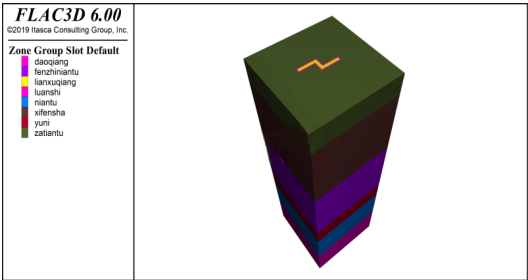


图 2 有限元三维模型

3.2 模型参数

该模型将地层简化为 6 层，使用摩尔库伦模型，地连墙深度为 50m，本模型存在 1 层承压水，对应实际工程中的承压水，水位埋深分别为 10m，承压水水头高度 1.5-4.5m。

在本研究中，土体计算域的边界条件设置如下：对于对称边界面，我们施加了法向的自由度约束，并且同时限制了垂直于另外两个方向的转动自由度，以确保边界条件的准确性。而对于非对称边界面，则仅对其法向的自由度进行了约束处理。

模拟中假定土体为固结不排水状态，成槽及所造成的地面荷载按 50kPa 计算。土体以及岩体参数选取参考下表 1。

表 1 地层物理力学参数表

土层名称	平均厚度	容重 kN/m^3	粘聚力 /kPa	内摩擦角 $^\circ$	弹性模量 /MPa	泊松比
杂填土	5	20	15	12.0	14.1	0.39
细粉砂	15	15	20.3	22.0	23.0	0.28
粉质粘土	15	18.4	18.2	16.9	35.0	0.30
淤泥	5	17.2	12.5	9	11.0	0.42
粘土	10	20.3	0	22	23	0.28
卵石	5	22.0	0	38.0	72.0	0.30

4 模拟结果分析

4.1 泥浆参数影响分析

为研究泥浆重度对槽壁稳定性的影响，建立三维数值模型，模拟泥浆重度为 11.2kN/m^3 、 11.7kN/m^3 、 12.2kN/m^3 、 12.7kN/m^3 时对槽壁稳定性的影响，其中地下水位高度为 -2m，泥浆重度对阳角处槽壁水平位移的影响规律如图 3 所示。

由槽壁水平位移曲线分析可得，伴随着泥浆密度的增大，槽壁侧向的水平位移呈现出逐渐减小的趋势。在泥

浆密度达到 12.7kN/m^3 的条件下，砂土层的位移量测得为 22mm，此数值为所考察四种工况中的最小值。进一步观察发现，随着泥浆密度的持续增加，槽壁的变形程度愈发减小。槽壁的变形模式趋向于一致性，其侧向水平位移曲线形态大致呈“M”字形。此外，泥浆所产生的压力与槽段的深度之间存在着一种线性相关性。尽管泥浆密度的增加对增强槽壁的稳定性有所裨益，但并非泥浆重度越大越好。在选择泥浆重度时，若泥浆重度过高，则会对后续的混凝土浇筑作业带来诸多不便，甚至可能对其质量产生负面影响。